

ACQUE

Ricerca
Trivellazione
Captazione

SOTTERRANEE

Anno XV - Dicembre '98 - Spedizione in abbonamento postale comma 20 B art. 2 legge 662/96 - Milano

FASCICOLO 60

GRUNDFOS



IN CONTINUA EVOLUZIONE



**L'USO DEI TRACCIANTI NELLO STUDIO DELLE ACQUE
SOTTERRANEE ED ESPERIENZE RELATIVE ALLA PUGLIA**

Maurizio Polemio & Donatella Mitolo
CNR-CERIST, Bari

L'uso dei traccianti nello studio delle acque sotterranee ed esperienze relative alla puglia.

M. Polemio & D. Mitolo

CNR-CERIST, Bari

SOMMARIO

Si descrivono alcune tecniche di studio basate sull'impiego di traccianti, con particolare riferimento alle esperienze maturate dalla comunità scientifica studiando le quattro unità idrogeologiche pugliesi, prevalentemente costituite da acquiferi rocciosi di natura carbonatica. La sintetica descrizione delle procedure utilizzate è integrata dall'analisi dei principali risultati conseguiti in alcune esperienze.

Le metodologie di studio basate sull'uso dei traccianti si sono dimostrate utili al fine di caratterizzare l'età delle acque sotterranee e la mobilità delle stesse, le modalità di circolazione idrica sotterranea e il moto degli inquinanti. In particolare, le misure relative al contenuto in radon delle acque di falda hanno evidenziato che negli acquiferi pugliesi a maggiori concentrazioni di radon nelle acque sotterranee corrisponde una maggiore mobilità delle stesse. I traccianti radioattivi utili per lo studio delle correnti verticali sono risultati lo iodio-131 ed il bromo-82, mentre tra i traccianti stabili è stato utilizzato il cloruro di cadmio in soluzione alcolica, anche se, di recente, l'impiego dello ioduro di potassio come tracciante ha mostrato anch'esso buoni risultati. La misura della direzione dei deflussi sotterranei in un pozzo singolo ha consentito di accertare sia l'inversione della direzione di deflusso delle acque dolci di falda in prossimità della costa, a causa delle oscillazioni del livello del mare, sia la direzione del moto delle acque di mare di invasione continentale, che in condizioni di alta marea è orientato verso il continente e che si inverte con la bassa marea.

1 PREMESSA

Nel corso degli ultimi decenni la ricerca idrogeologica nel territorio pugliese ha avuto un grande impulso, spinta dalla necessità di fornire risposte sempre più complesse alle domande che emergevano al crescere della domanda di acque sotterranee.

Ci si è posti, di volta in volta, il fine di pervenire all'individuazione dei caratteri geometrici degli acquiferi, del tipo e del grado di permeabilità, della modalità di flusso delle acque nel sottosuolo, della distribuzione dei carichi idraulici con la profondità, delle aree di alimentazione, dei tempi di residenza delle acque nel sottosuolo.

In un secondo tempo, al crescere dei timori di degrado delle risorse idriche sotterranee, le indagini sono state orientate

non solo allo studio delle potenzialità degli acquiferi ma anche e soprattutto alla salvaguardia della risorsa, perseguendo un corretto e sostenibile sfruttamento della stessa.

In tutti questi casi sono state frequentemente utilizzate tecniche di studio basate sull'uso dei traccianti. Con il presente lavoro si vuole descrivere brevemente alcune di queste tecniche e richiamare i principali risultati conseguiti negli anni, senza la pretesa di un esame sistematico ed esaustivo delle stesse. I risultati sono stati inseriti in un quadro unitario, avendo come riferimento le quattro unità idrogeologiche pugliesi.

Le tecniche che si basano sull'uso di traccianti, naturalmente presenti nell'ambiente o artificialmente immessi, offrono un notevole apporto negli studi sulla circolazione delle acque e quindi su quella degli inquinanti.

L'uso dei traccianti artificiali, come ad esempio il bromo-82, consente di ottenere, attraverso pozzi, ad un costo relativamente modesto, dati relativi alla velocità di filtrazione, all'esistenza di correnti verticali e alla direzione dei deflussi sotterranei. L'impiego di questi traccianti costituisce uno dei mezzi più efficaci attualmente disponibili negli studi sulla circolazione idrica sotterranea.

Anche l'uso degli isotopi ambientali nelle ricerche idrogeologiche ha avuto un notevole sviluppo negli ultimi decenni. Questi isotopi determinano un marcamento delle acque sotterranee su grande scala e forniscono informazioni sull'origine e sui tempi di residenza delle acque nel sottosuolo, nonché sulla localizzazione del bacino di alimentazione.

Dall'analisi dei contenuti naturali in tritio e carbonio-14 si possono invece trarre indicazioni sui tempi di permanenza delle acque nel sottosuolo, sui tassi di rinnovamento e sulle entità di eventuali miscelamenti tra acque antiche e recenti, e quindi sull'età delle acque.

2 INQUADRAMENTO DELLE UNITA' IDROGEOLOGICHE PUGLIESI

Le unità idrogeologiche della regione Puglia sono essenzialmente quattro: Gargano, Tavoliere, Murgia e Salento (Fig. 1). Per una più dettagliata caratterizzazione delle quattro unità idrogeologiche, qui brevemente delineata, si rimanda per brevità alla nota di COTECCHIA & POLEMIO (1998) e alla relativa bibliografia.

Eccetto il Tavoliere, le restanti unità idrogeologiche hanno in comune alcuni aspetti. Sono caratterizzate da ampi e potenti

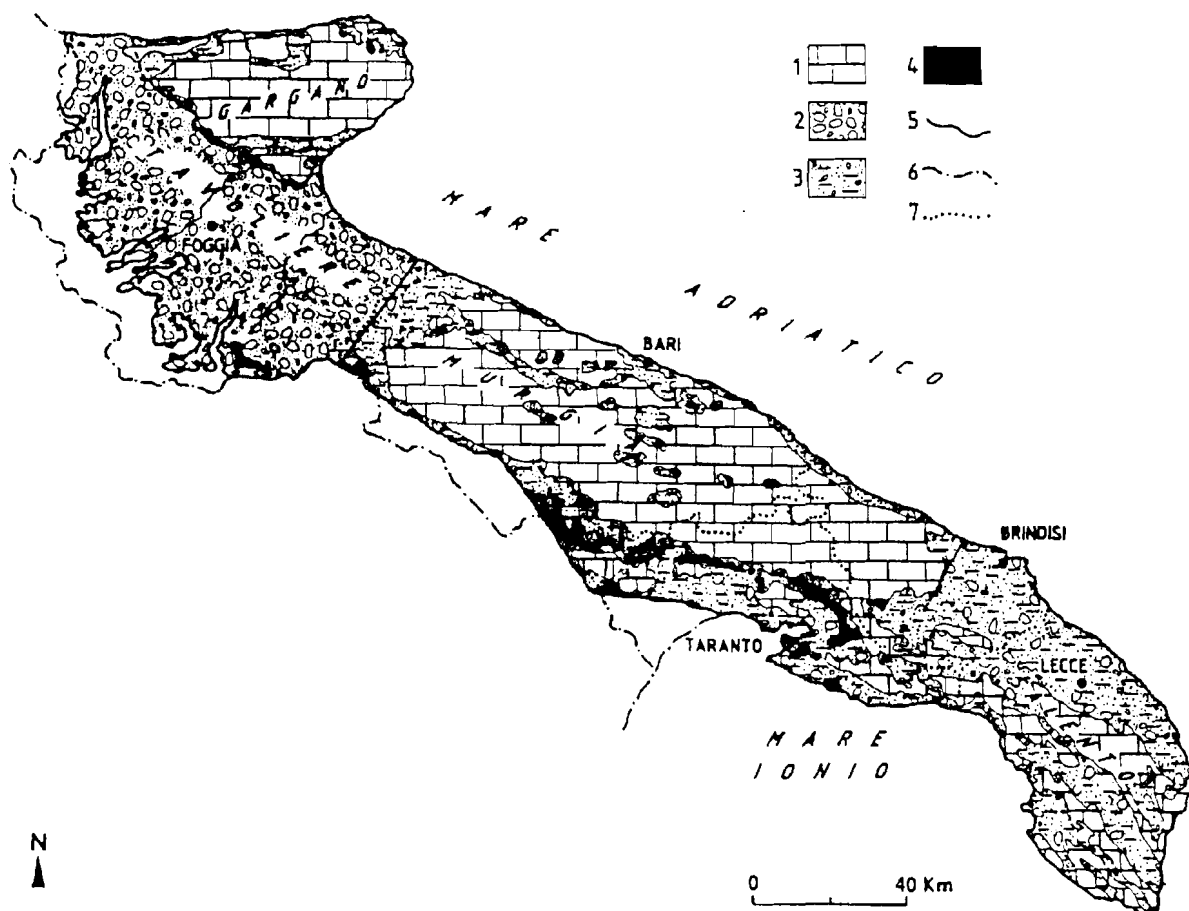


Fig. 1 - Unità idrogeologiche della Puglia (da COTECCHIA & POLEMIO, 1998). 1) Rocce carbonatiche affioranti nel Gargano, della Murgia e nel Salento, 2) unità idrogeologica del Tavoliere, principalmente costituita da conglomerati e sabbie, 3) acquiferi superficiali e litotipi permeabili, calcareniti, sabbie argillose, sabbie, ghiaie o conglomerati, 4) litotipi poco permeabili, argille e argille marnose, 5) limite delle unità idrogeologiche, 6) confine regionale, 7) confine provinciale.

acquiferi con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico. Gli acquiferi sono interessati da fenomeni carsici e caratterizzati da un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, mostrando quindi, a luoghi, una elevata permeabilità.

Sia nel Gargano che nella Murgia la circolazione idrica sotterranea è in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera. Le quote piezometriche massime sono elevate, pari a circa 50 m s.l.m. nel caso del Gargano e 200 m s.l.m. nel caso della Murgia.

Nel Salento la circolazione idrica sotterranea è prevalentemente freatica. L'unità idrogeologica del Salento è caratterizzata quindi da una estesa falda idrica freatica, denominata "profonda" per distinguerla da altre numerose falde idriche rinvenibili in acquiferi poco potenti ed estesi, generalmente affioranti. Le falda idrica profonda del Salento raggiunge quote piezometriche di pochi metri al di sopra del livello del mare (al massimo 4-5 m s.l.m.).

L'unità idrogeologica del Tavoliere è caratterizzata da un acquifero poroso la cui circolazione idrica sotterranea a letto è limitata da una formazione argillosa potente alcune centinaia di metri ed avviene in condizioni freatiche nella parte più interna del territorio e in pressione più a valle, fino alla costa. La superficie piezometrica della falda idrica superficiale si rinviene

a circa 300 m s.l.m. nelle zone più interne. Solo nei pressi della costa l'acquifero è abbastanza profondo da permettere l'intrusione marina. L'unità del Tavoliere è l'unica le cui acque alimentano il reticolo idrografico lontano dalla costa.

3 LA NATURA DEI TRACCIANTI E LE METODOLOGIE UTILIZZATE

Gli isotopi di un determinato elemento sono atomi o nuclidi aventi, rispetto ad altri atomi dello stesso elemento, uguale numero di protoni nel nucleo e diverso numero di neutroni, e quindi diverso peso atomico. Quando un nucleo di una specie isotopica è instabile l'isotopo stesso tende a raggiungere una configurazione nucleare stabile subendo spontaneamente una trasformazione nucleare (*decadimento radioattivo*), accompagnata da emissione di particelle nucleari e/o fotoni di energia: il fenomeno è noto come *radioattività* e gli isotopi instabili sono detti *radioisotopi* (IAEA, 1968).

Durante il processo di decadimento radioattivo possono essere emessi 3 tipi differenti di radiazione:

raggi α - fasci di nuclei di elio (particelle alfa o elioni) costituiti da 2 protoni e 2 neutroni;

raggi β - formati da fasci di elettroni o di positroni;
raggi γ - radiazione elettromagnetica di altissima energia.

Nelle ricerche idrogeologiche gli isotopi, sia radioattivi che stabili, vengono impiegati come *traccianti* al fine di studiare alcuni aspetti particolari. Tra tali aspetti si annovera: l'età delle acque sotterranee, che permette di formulare ipotesi sulla provenienza delle acque, sull'alimentazione, sulle connessioni fra bacini e/o sulla capacità di immagazzinamento, la velocità di filtrazione delle acque, la direzione del flusso sotterraneo, la velocità delle correnti idriche verticali nei pozzi che, a sua volta, permette di valutare la distribuzione dei carichi idraulici con la profondità.

Sull'impiego di questi *traccianti isotopici* si basano quindi le tecniche isotopiche che, oltre a quanto detto, permettono anche di risalire al tipo di contaminazione sia artificiale (p.e. per immissione di rifiuti convenzionali o radioattivi) sia naturale (p.e. per l'influenza dell'acqua marina di intrusione continentale), che si esplica nei confronti delle acque sotterranee.

Generalmente non tutte le sostanze solubili in acqua, la cui concentrazione può essere misurata, vengono usate come traccianti. Il tracciante ideale, in pratica, deve presentare alcuni requisiti: non deve presentare alcuna affinità chimica con gli elementi costituenti la roccia, per evitare che il tracciante stesso possa fissarsi su questa; deve essere altamente solubile in acqua; nel caso di traccianti radioattivi, il periodo di dimezzamento del tracciante stesso deve essere compatibile con la durata delle prove; deve presentare una alta attività specifica, in modo che il suo peso specifico sia prossimo a quello dell'acqua, per evitare correnti di densità nella colonna idrica del pozzo in cui si immette; soprattutto, infine, deve possedere una bassissima tossicità (GASPAR & ONCESCU, 1972).

Per le indagini riguardanti l'origine e i tempi di residenza negli acquiferi delle acque sotterranee sono stati impiegati gli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno come *traccianti ambientali o naturali* (*ambientali o naturali* perché presenti naturalmente nelle acque sotterranee), mentre lo studio sulla mobilità delle acque sotterranee è stato affrontato misurando i *contenuti naturali di radon*.

Per le misure indirette della velocità di filtrazione delle acque sotterranee e delle correnti verticali di pozzi sono state impiegate delle *sonde a radioisotopi*; le stesse sono anche risultate di grande aiuto per la determinazione del grado di fessurazione e della porosità in genere degli acquiferi, nonché per la misura in sito del contenuto in cloro delle acque sotterranee (COTECCHIA, 1977).

3.1 TRACCIANTI NATURALI

E' noto che nelle acque sono presenti diversi componenti chimici la cui concentrazione è funzione di diversi fattori come la litologia delle rocce attraversate, i tempi di contatto acqua-roccia e le condizioni di temperatura e pressione esistenti nel sottosuolo.

Nelle stesse acque si trovano in soluzione anche delle sostanze, la cui concentrazione è funzione soltanto delle caratteristiche proprie dell'acqua di infiltrazione, che possono essere utilizzate come traccianti naturali.

Questi traccianti naturali sono rappresentati sia dagli isotopi stabili che dai radioisotopi.

3.1.1 Traccianti stabili naturali

Nelle prospezioni idrogeologiche i traccianti stabili naturali servono principalmente a caratterizzare l'acqua ed a determinarne l'origine e l'età.

Gli isotopi stabili più utilizzati sono quelli dell'ossigeno (^{16}O , ^{17}O e ^{18}O) e dell'idrogeno (^1H e D).

Altri traccianti naturali che si rinvenivano nelle acque sotterranee, però in piccole quantità, sono gli isotopi stabili del carbonio (carbonio-12 e il carbonio-13), il silicio-32, l'azoto-15, lo zolfo-34.

a) Ossigeno-18 e deuterio

Tra gli isotopi stabili, naturalmente presenti nelle acque, l'ossigeno-18 (^{18}O) ed il deuterio (D), isotopi rispettivamente dell'ossigeno e dell'idrogeno, sono quelli che vengono impiegati principalmente. Si trovano in natura in piccole quantità (0,20% e 0,015% rispettivamente per ^{18}O e D) e rappresentano degli ottimi traccianti perché fanno parte della molecola dell'acqua. Grazie ad essi, infatti, è possibile calcolare la quota media di infiltrazione delle acque sotterranee, permettendo così, in situazioni idrogeologiche dubbie, di localizzarne il bacino di alimentazione.

Entrambi sono espressi in differenza per mille ($\delta\text{‰}$) del rapporto isotopico del campione rispetto allo stesso rapporto nello standard, secondo l'espressione:

$$\delta = [(R_{\text{cp}} / R_{\text{st}}) - 1] * 1000$$

dove, per l'ossigeno:

R_{cp} = rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ del campione

R_{st} = rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dello standard

e, per l'idrogeno:

R_{cp} = rapporto $\text{D}/^1\text{H}$ del campione

R_{st} = rapporto $\text{D}/^1\text{H}$ dello standard

Lo standard è generalmente rappresentato dallo SMOW (Standard Mean Ocean Water) (CRAIG, 1961) che rappresenta il valore medio della composizione isotopica delle acque oceaniche.

Sulla base della loro abbondanza relativa si è convenuto di utilizzare i rapporti $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $\text{D}/^1\text{H}$ per lo studio del frazionamento isotopico dell'ossigeno e dell'idrogeno.

Nelle acque meteoriche il comportamento del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ è strettamente legato a quello del rapporto $\text{D}/^1\text{H}$; ad esempio una massa di vapore acqueo formatasi in seguito all'evaporazione dell'acqua oceanica nelle regioni tropicali subirà, durante la sua migrazione verso le zone polari, una progressiva diminuzione del rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in seguito alle precipitazioni che avvengono durante il trasporto. Il vapore d'acqua che raggiunge le zone polari condenserà e il rapporto $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ sarà perciò estremamente basso.

In tal modo i rapporti isotopici tra ^{18}O e ^{16}O e tra D e ^1H subiscono delle variazioni in funzione della temperatura di evaporazione e di condensazione dell'acqua e quindi dell'altitudine a cui avvengono le precipitazioni. Ne consegue che le determinazioni dei rapporti isotopici $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $\text{D}/^1\text{H}$ permettono di ottenere numerose e preziose informazioni idrologiche quali, per es., l'individuazione delle aree in cui è avvenuta la ricarica delle acque sotterranee e, in alcuni casi, anche i periodi dell'anno durante i quali tale ricarica ha avuto luogo (TAZIOLI,

1973).

La determinazione di tali isotopi avviene tramite l'ausilio di uno *spettrometro di massa*, previo prelievo di 20 ml di acqua.

Lo spettrometro di massa è, generalmente, uno strumento che viene usato sia per la misura dei rapporti isotopici, sia per la determinazione di minime concentrazioni di elementi nelle rocce e nei minerali (da pochi ppm sino a nanogrammi) con notevole precisione; infatti, è stato impiegato per la determinazione degli isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno (^{18}O e D) con una precisione dello 0,1% per $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e dell'1% per $\text{D}/^1\text{H}$.

Esso è costituito da quattro componenti principali: una *sorgente*, dove gli atomi o le molecole sono trasformate in un fascio di ioni di uguale energia; un *elettromagnete*, che genera un campo magnetico a intensità variabile; un *collettore di ioni*, tramite il quale l'intensità relativa ai vari fasci ionici può essere misurata ed un *tubo di acciaio o di vetro*, che collega sorgente e collettore su uno stesso piano con un certo angolo. Tutti i componenti, tranne il magnete, si trovano sotto vuoto spinto.

Gli ioni di diversa massa, prodotti e accelerati dalla sorgente, passano nel tubo, attraversando il campo magnetico che è perpendicolare alla direzione del movimento. Il campo magnetico devia la traiettoria degli ioni ugualmente carichi in modo proporzionale alla massa (cioè quelli a massa maggiore sono deviati meno di quelli a massa minore). I fasci ionici, così deviati, raccolti tramite una sottile fenditura, vengono captati separatamente da un collettore e la loro intensità relativa viene misurata elettronicamente. Variando il campo magnetico, i vari fasci ionici passeranno attraverso la fenditura nel collettore, uno dopo l'altro. La corrente portata dai diversi fasci ionici è amplificata elettronicamente. Il tracciato dei segnali così ottenuto è costituito da una serie di picchi ciascuno dei quali corrisponde ad una determinata massa mentre l'altezza del picco stesso è proporzionale all'intensità del fascio di ioni e quindi, nel caso di un elemento, alla concentrazione relativa dell'isotopo che lo compone. Dal rapporto delle intensità elettriche si risale quindi alla misura del rapporto isotopico.

b) Azoto-15

^{15}N è un tracciante stabile naturale ed il suo impiego nelle prospezioni idrogeologiche serve ad individuare eventuali cause d'inquinamento.

Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard, l'azoto atmosferico (^{14}N).

c) Zolfo

Lo ^{34}S è un tracciante stabile naturale che viene usato principalmente per distinguere l'acqua di mare dall'acqua dolce e consente, inoltre, di distinguere i solfati dovuti ad ossidazione delle evaporiti antiche o a H_2S di origine biogenica (IAEA, 1962). Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard, troilite meteoritica (FeS) (CELICO, 1990).

Lo ^{35}S invece, con un periodo di dimezzamento di 87 giorni, è indicato per esperimenti di una certa durata (LALLEMAND & GRISON, 1970).

3.1.2 Traccianti radioattivi naturali

I traccianti radioattivi naturali servono essenzialmente a determinare l'età dell'acqua; tra questi, quelli principalmente utilizzati sono il tritio (T), il carbonio-14, il carbonio-13, il

silicio-32 ed il radon-222.

a) Tritio

Il tritio (T), generato nell'atmosfera per interazione dei raggi cosmici con i componenti dell'atmosfera stessa, in particolare con ^{14}N , è praticamente indicato per rivelare ravvenimenti recenti, infatti permette datazioni di acqua fino a ≈ 50 anni, considerando che il suo periodo di dimezzamento è tra 12,26-12,46 anni e che la concentrazione massima nelle acque di precipitazione, precedentemente alle esplosioni termonucleari del 1952, era pari a 20 UT (una Unità Tritio corrisponde ad un atomo di tritio ogni 1018 atomi di idrogeno).

Il tritio viene determinato per scintillazione in fase liquida o gassosa.

b) Carbonio-14

Il ^{14}C , prodotto per interazione di neutroni con l'azoto negli strati alti dell'atmosfera, viene usato per la datazione di acque da 1.000 a 30.000 anni (periodo di dimezzamento tra 5.400-5.570 anni). Viene espresso in differenza per mille (‰) in rapporto ad uno standard (NBS, National Bureau of Standards).

Generalmente per la sua determinazione occorre un prelievo di 50-100 litri d'acqua ed anch'esso, come il tritio, viene determinato per scintillazione in fase liquida o gassosa.

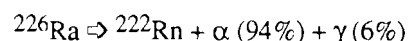
c) Silicio-32

Il ^{32}Si è generato per interazione dei raggi cosmici con l'argon, la cui totale produzione annuale è dell'ordine di 2-6 giorni. Avendo un periodo di dimezzamento di 710 anni, consente di datare acque di 1.000-2.000 anni di età anche se difficilmente viene impiegato per studi idrogeologici in quanto per essere determinato occorrono da 5 a 20 tonnellate di acqua.

La determinazione del ^{32}Si avviene indirettamente per mezzo del suo discendente, il fosforo-32 (periodo di dimezzamento pari a 14,22-14,60 giorni) (IAEA, 1968).

d) Radon-222

Il ^{222}Rn , elemento radioattivo gassoso, solubile in acqua, sempre presente nelle acque sotterranee e avente periodo di dimezzamento di 3,82 giorni, si origina per decadimento radioattivo del ^{226}Ra secondo la reazione:



La determinazione del ^{222}Rn avviene o per concentrazione su carbone attivo granulare e conteggio dell'attività gamma dei suoi prodotti di decadimento a vita breve, per mezzo di rivelatori a scintillazione gamma, o per scintillazione alfa previo degassamento da campioni di acqua (MAGRI & TAZIOLI, 1968).

Il primo metodo si basa sulla misura della concentrazione di radon fissato su carbone attivo mediante filtrazione del campione d'acqua per almeno 2 ore (tempo di filtrazione necessario affinché si fissi su carbone attivo una quantità di radon pari al 50% di quello necessario per la saturazione del carbone). La misurazione si effettua in sito con un contatore a scintillazione gamma, dopo aver atteso che il radon si ponga in equilibrio con i suoi prodotti di decadimento a vita breve (circa 3 ore). Per risalire alla concentrazione di radon nelle acque, dal conteggio dei campioni di carbone, è stata elaborata una curva di taratura, misurando la radioattività del carbone dovuta a filtrazione di

acque a nota concentrazione in radon; gli standard si ottenevano facendo gorgogliare nell'acqua il radon prodotto da una soluzione di cloruro di radio. La concentrazione in radon è di volta in volta misurata con un contatore a scintillazione (cristallo NaI/Tl) direttamente su campioni di acqua. La minima attività rivelabile è dell'ordine di 30 pCi/l.

Tale metodo, pur offrendo il vantaggio di poter essere applicato direttamente in sito, non è attualmente impiegato a causa dei lunghi tempi di esecuzione e per le ridotte limitazioni di prelievo di campioni d'acqua con pompe peristaltiche.

Il metodo per la determinazione della concentrazione del radon nelle acque sotterranee attualmente si basa sull'impiego di un contatore a scintillazione alfa. Con tale strumento è possibile operare direttamente sul campione d'acqua, previo degassamento dello stesso. Il degassamento avviene con una semplice apparecchiatura meccanica: il campione d'acqua viene immerso in una buretta e con una differenza di pressione, realizzata in precedenza, si trasferisce l'eventuale gas radioattivo dal campione ad una cella di conteggio, rivestita di solfato di zinco argentato, ZnS(Ag). Dopo un certo periodo di posa (alcune ore), onde consentire un equilibrio radioattivo dei gas racchiusi nella cella, la stessa viene inserita nel contatore a scintillazione per quantificare le particelle alfa emesse dal radio di gas radioattivo (TADOLINI & SPIZZICO, 1996).

Questo metodo offre il vantaggio di essere eseguito anche in laboratorio richiedendo tempi di esecuzione molto brevi.

3.2 TRACCIANTI ARTIFICIALI

I traccianti artificiali sono delle sostanze che possono essere facilmente immesse e rilevate nelle acque sotterranee allo scopo di comprendere i principali aspetti idrodinamici e di determinare alcuni parametri idrogeologici dell'acquifero. Generalmente come traccianti artificiali si utilizzano sostanze non presenti naturalmente nelle acque, in modo da effettuare più semplici interpretazioni delle misure.

L'impiego dei traccianti artificiali ha lo scopo di: riconoscere le comunicazioni sotterranee (p.e. tra un inghiottitoio ed una sorgente), localizzare gli sbocchi sottomarini, individuare i possibili punti di immissione di eventuali inquinanti, determinare le direzioni principali di flusso delle acque, calcolare la velocità e la portata delle falde, determinare la permeabilità e la trasmissività dell'acquifero.

I punti di immissione sono generalmente rappresentati da inghiottitoi, fossi a fondo permeabile, zone di irrigazione, scarichi inquinanti, corsi d'acqua, pozzi, sondaggi, ecc..

Il tracciamento artificiale si basa su procedimenti di "stimolo-risposta" eseguiti generalmente in condizioni stazionarie. Lo stimolo consiste nell'immettere un tracciante nel sistema idrico in esame, mentre la risposta è la registrazione nel tempo della quantità o della concentrazione che passa in un determinato punto posto a valle, ad una certa distanza dal punto d'immissione. La risposta permette di formulare la cosiddetta "curva di restituzione" che rappresenta, in pratica, la distribuzione dei tempi di residenza, e consente di interpretare i processi che si manifestano all'interno del sistema acquifero, mediante l'ausilio di modelli matematici di propagazione (IAEA, 1971).

I traccianti artificiali possono distinguersi in *stabili* e in *radioattivi*.

3.2.1 Traccianti stabili artificiali

I traccianti stabili artificiali sono di due tipi: i *coloranti* e gli *elementi chimici solubili* o *soluti*.

I primi sono più facilmente rilevabili, mediante colorimetri, e quindi più frequentemente impiegati dei traccianti chimici solubili.

a) Traccianti coloranti

Tra i **traccianti coloranti** i più diffusi sono la fluoresceina, l'uranina, la rodamina B, il rosso d'anilina, il blu di metilene. Tali traccianti sono anche denominati "traccianti non conservativi" in quanto hanno la capacità di interagire con il mezzo filtrante.

L'interazione generalmente si manifesta con un "ritardo" del fronte di avanzamento dello stesso tracciante rispetto al flusso nel quale viene immerso. Occorre quantificare tale ritardo per poter apportare opportune correzioni ai dati ricavati dall'elaborazione della curva di restituzione del tracciante.

Le sostanze coloranti utilizzate come traccianti rappresentano anch'esse una categoria di soluti che possono interagire con la matrice solida dell'acquifero producendo quindi errori di interpretazione. A tale proposito si è visto che il fattore di ritardo per soluti (R) può essere facilmente ricavato come rapporto tra la velocità lineare effettiva dell'acqua lungo la linea di flusso (V_1) e la velocità del soluto ritardato (V_2) mediante procedura su colonna idrica, in condizioni di flusso. Tale sperimentazione prevede il passaggio del soluto, trasportato da un flusso di acqua noto, attraverso un letto costituito dalla matrice solida dell'acquifero in esame e la registrazione della concentrazione degli stessi in uscita dalla colonna. Il rapporto tra la velocità del flusso d'acqua e quella di uscita dei soluti fornirà il ritardo.

Tra i vari tipi di traccianti coloranti la **fluoresceina** è il più utilizzato perché è caratterizzato da una grande solubilità e può essere rilevato, ad occhio nudo, fino a concentrazioni debolissime (0,1 mg/l). Essa stessa offre il vantaggio di essere scarsamente assorbita dalle rocce, tranne che dai minerali argillosi e dalle materie organiche, di contro invece può essere decolorata dall'acqua clorata e può non essere più visibile in acque torbide; in quest'ultimo caso è necessario filtrare la soluzione campionata prima dell'esame.

La fluoresceina è normalmente impiegata in soluzione alcolica (1 kg in 5 litri di alcool etilico) diluita in ≈ 50 litri di acqua. Nell'alcool, prima di sciogliere il colorante, viene aggiunta una piccola quantità di ammoniaca (0,25 ml) per rendere la soluzione alcalina e per evitare che il tracciante si decolori in presenza di acque ricche di anidride carbonica (CELICO, 1990).

La fluoresceina o altri coloranti offrono il vantaggio di essere usati in pozzi destinati ad immediato uso domestico anche se, di contro, il loro impiego comporta operazioni lunghe e laboriose (TAZIOLI, 1973).

b) Traccianti chimici solubili

Gli elementi chimici solubili, o soluti, comprendono sia gli *elettroliti forti*, rilevabili con misure di conducibilità, sia alcuni sali, le cui concentrazioni si determinano in sito mediante sonde a neutroni. Generalmente i sali usati come traccianti sono rappresentati da molecole aventi atomi di grossa sezione di cattura per i neutroni termici (MAESTRINI, 1965; PIRASTRU et alii, 1966): si ricorda che i neutroni termici presentano una energia cinetica molto bassa, dell'ordine di $2,5 \cdot 10^{-2}$ eV, dovuta

solo al moto di agitazione termica. A differenza dei traccianti coloranti, gli elementi chimici solubili non interagiscono con la matrice solida dell'acquifero.

Le sostanze che in un primo momento sono state impiegate come traccianti chimici solubili per le ricerche idrogeologiche erano rappresentate essenzialmente da nitrato tetraidrato di cadmio $\text{CdNO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; in seguito sono stati impiegati il cloruro di cadmio biidrato $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, il solfato di cadmio ottoidrato $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ e il metaborato di sodio ottoidrato $\text{NaBO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. Tra questi un sale efficace è stato il *cloruro di cadmio*, in quanto può essere misurato fino a concentrazioni di 0.005 g/l circa e, da quanto emerge dalla Tab. 2.2, presenta una sezione di cattura più grande rispetto agli altri sali, producendo di conseguenza differenze di conteggio più alte (COTECCHIA & PIRASTRU, 1969). Il suo primo impiego (PIRASTRU et alii, 1966), mediante una sonda a neutroni, è risultato indispensabile nel determinare la velocità di filtrazione dell'acqua sotterranea con il metodo del pozzo singolo. Tuttavia i problemi esistenti sono stati diversi: in primo luogo per ottenere una maggiore sensibilità del metodo si richiedeva l'utilizzo di sorgenti di neutroni più intense, in secondo luogo è stato dimostrato, con prove in laboratorio, che concentrazioni di NaCl in acqua pari a circa 20-40 g/l riducevano la densità neutronica del 15-30 % rispetto a quella registrata in acqua pura.

Attualmente sono in fase di sperimentazione alcune metodiche che prevedono l'impiego di alcuni sali in pozzi, quali *ioduro di potassio, bromuro di sodio e ioduro di sodio* (SPIZZICO, 1998). La scelta nell'utilizzare questi sali come traccianti stabili, anziché altri, è stata fatta in base ad alcuni vantaggi: facile reperibilità del tracciante, basso costo, elevata solubilità in acqua, rilevabilità anche di minime concentrazioni e bassissima tossicità.

c) Nuovi traccianti e loro impiego

Sulla base di una maggiore sensibilità al problema dell'inquinamento delle acque si è cercato di individuare e, quindi, impiegare sostanze traccianti tali da non produrre conseguenze inquinanti delle risorse idriche.

Recentemente DI FAZIO & VOLTERRA (1994) hanno proposto come tracciante la *clorofilla*, un pigmento naturale che, essendo di natura biologica e quindi ecologicamente compatibile in acquiferi destinati anche all'approvvigionamento idrico potabile, presenta buone caratteristiche fluidinamiche ed è facilmente rilevabile a basse concentrazioni. Tuttavia sono ancora in corso sperimentazioni di laboratorio per la caratterizzazione idrodinamica della clorofilla come tracciante, per determinare la capacità di adsorbimento della matrice solida dell'acquifero e la stabilità della stessa nel tempo (DI FAZIO, 1997).

3.2.2 Traccianti radioattivi artificiali

Sono rappresentati dai cosiddetti *radioisotopi* che, a differenza dei traccianti radioattivi naturali, vengono liberati tramite esplosioni nucleari prodotti in appositi reattori nucleari per bombardamento di elementi stabili con neutroni. Sono sostanze solubili in acqua, le cui molecole contengono un atomo radioattivo che emette radiazioni beta o gamma (COTECCHIA, 1977).

I traccianti *emettitori beta* più conosciuti sono ^{32}P , ^{35}S , ^{14}C e T. Tra questi il *tritio* sembra essere il migliore in quanto presenta le stesse caratteristiche chimiche dell'idrogeno (pròzio)

dell'acqua da tracciare. Le radiazioni beta emesse sono però poco energetiche (max 18,1 keV) e perciò non consentono la rivelazione diretta in sito. È importante ricordare anche che l'immissione di tritio artificiale nelle falde è sconsigliabile qualora si vogliano condurre studi sulla datazione delle stesse acque e sulle modalità di ravvenamento, in quanto il tritio risulta anche come radioelemento naturalmente presente nelle acque di falda (PIRASTRU et alii, 1966).

Tra i traccianti *emettitori gamma* vengono maggiormente impiegati ^{82}Br , ^{131}I , ^{51}Cr -EDTA; i meno usati sono invece ^{24}Na , ^{59}Fe , ^{110}Ag , ^{137}Ce , ^{60}Co e ^{86}Rb .

Di più facile impiego sono proprio i traccianti emettitori gamma in quanto vengono rilevati in sito mediante apparecchiature di impiego abbastanza semplici: contatori di Geiger-Müller o rivelatori a scintillazione, misuratori di impulsi e scale di conteggio. Al contrario i traccianti emettitori beta vengono rilevati in laboratorio mediante apparecchiature a scintillazione in fase liquida.

In linea di massima i radioisotopi hanno il vantaggio di offrire una migliore sensibilità di misura anche in concentrazioni piuttosto deboli, rispetto alle soluzioni colorate ed alle soluzioni saline (traccianti stabili artificiali), per cui per molte ricerche idrogeologiche è sufficiente immettere in falda solo pochi millicurie, senza che il chimismo e la densità dell'acqua vengano alterati in modo apprezzabile. L'impiego dei traccianti diviene praticamente impossibile soltanto in due casi: quando l'acqua da sperimentare deve essere utilizzata in breve tempo, il che non consente il benché minimo e temporaneo pericolo di contaminazione, e quando ci si trova a lavorare in regioni lontane da reattori nucleari, costituenti le fonti principali dei radioisotopi che si impiegano negli esperimenti (COTECCHIA & PIRASTRU, 1983).

a) Bromo-82 e iodio-131

Sia il ^{82}Br che lo ^{131}I (con periodo di dimezzamento rispettivamente di 35,87 ore e di 8,04-8,08 giorni) danno risultati molto soddisfacenti in situazioni idrogeologiche di falde galleggianti su acqua marina in quanto gli stessi elementi stabili presenti naturalmente nelle acque fungono da trascinatori per gli isotopi radioattivi emessi. Stesso vantaggio offrirebbe l'uso del ^{24}Na , ma il suo impiego è molto limitato per la pericolosità dell'alta energia delle sue radiazioni gamma (TAZIOLI, 1973).

b) Cromo-51-EDTA

Il ^{51}Cr -EDTA (complessato con acido etil-diaminotetracetico) viene normalmente usato per esperimenti di media durata (periodo di dimezzamento di 27,8 giorni) ed ha la prerogativa di non essere assorbito neanche da terreni argillosi (TAZIOLI, 1973).

3.3 ESEMPI DI APPLICAZIONE DEI TRACCIANTI AGLI ACQUIFERI PUGLIESI

Allo scopo di ottenere informazioni circa l'età e l'origine delle acque sotterranee pugliesi sono state impiegati alcuni isotopi stabili, determinando quindi il contenuto in carbonio-14, carbonio-13, ossigeno-18 e deuterio.

Informazioni sulla circolazione idrica sotterranea sono state ottenute mediante determinazione del contenuto in radon-222 nelle acque delle principali sorgenti costiere sgorganti in

ELEMENTO	ISOTOPI	TIPO DI DECADIMENTO	TEMPO DI DIMEZZAMENTO	ABBOND. RELAT. IN NATURA (%)	ETÀ DELL'ACQUA
idrogeno	^1H $^2\text{H}=\text{D}$ $^3\text{H}=\text{T}$	stabile stabile β^-	12,26 ÷ 12,46 anni	99,985 0,015 ($10^{-15} + 10^{-12}$)	50 anni
ossigeno	^{16}O ^{17}O ^{18}O	stabile stabile stabile		99,76 0,04 0,20	
carbonio	^{12}C ^{13}C ^{14}C	stabile stabile β^-	5.400 ÷ 5.570 anni	98,89 1,11 ($1,2 \cdot 10^{-10}$)	1.000 ÷ 30.000 anni
argon	^{39}Ar	β^-	265 anni		
fosforo	^{32}P	β^-	14,22 ÷ 14,60 giorni		
silicio	^{32}Si	β^-	710 anni		1.000 ÷ 2.000 anni
azoto	^{15}N	stabile		0,365	
zolfo	^{34}S ^{35}S	stabile β^-	87 giorni	4,22	
radio	^{226}Ra	α, γ	1.590 ÷ 1.622 anni		
radon	^{222}Rn	α, γ	3,82 giorni		
cromo	$^{51}\text{Cr-EDTA}$	γ	27,8 giorni		
iodio	^{131}I	β^-, γ	8,04 ÷ 8,08 giorni		
bromo	^{82}Br	β^-, γ	35,87 ore		

Tab. 1 - Tabella riassuntiva di alcuni isotopi stabili e radioattivi, con relativo tempo di dimezzamento di questi ultimi (da "U.S. DEPARTEMENT OF HEALTH, 1960).

Composti	Sezione macroscopiche cm^{-1}	Flusso termico $\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$	Differenza % con l'acqua	Solubilità ($\text{g}/100 \text{ cm}^3$ di acqua)
H_2O	0,01965760	$4,439 \cdot 10^{-3}$	-	-
$\text{NaBO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	0,02156684	$4,110 \cdot 10^{-3}$	- 7,41 %	molto sol.
$\text{CdNO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0,02388408	$3,861 \cdot 10^{-3}$	- 13,01 %	109 (a 20°)
$3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	0,02474150	$3,766 \cdot 10^{-3}$	- 15,15 %	140 (a 0°)
$\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$	0,02552847	$3,683 \cdot 10^{-3}$	- 17,01 %	168 (a 0°)

Tab. 2 - Sezioni macroscopiche di cattura e flussi neutronici termici per una concentrazione dei composti nell'acqua pari a 0,001 g/cm³ (da COTECCHIA & PIRASTRU, 1969).

tutto il territorio pugliese.

Misure della velocità di filtrazione e della direzione del deflusso sotterraneo, delle correnti verticali lungo la colonna idrica di sondaggi, sono state condotte mediante l'impiego di traccianti radioattivi artificiali, in maniera più dettagliata nel Salento e precisamente nella zona delle sorgenti Idume.

3.3.1 Misura del contenuto di alcuni isotopi stabili

Relativamente alle acque sotterranee dell'acquifero carbonatico della Murgia i valori di δD e $\delta^{18}O$ hanno permesso di individuare e delimitare tre zone differenti per morfologia e per caratteristiche climatiche (zone A, B, C in Fig. 2 e 3). Ogni

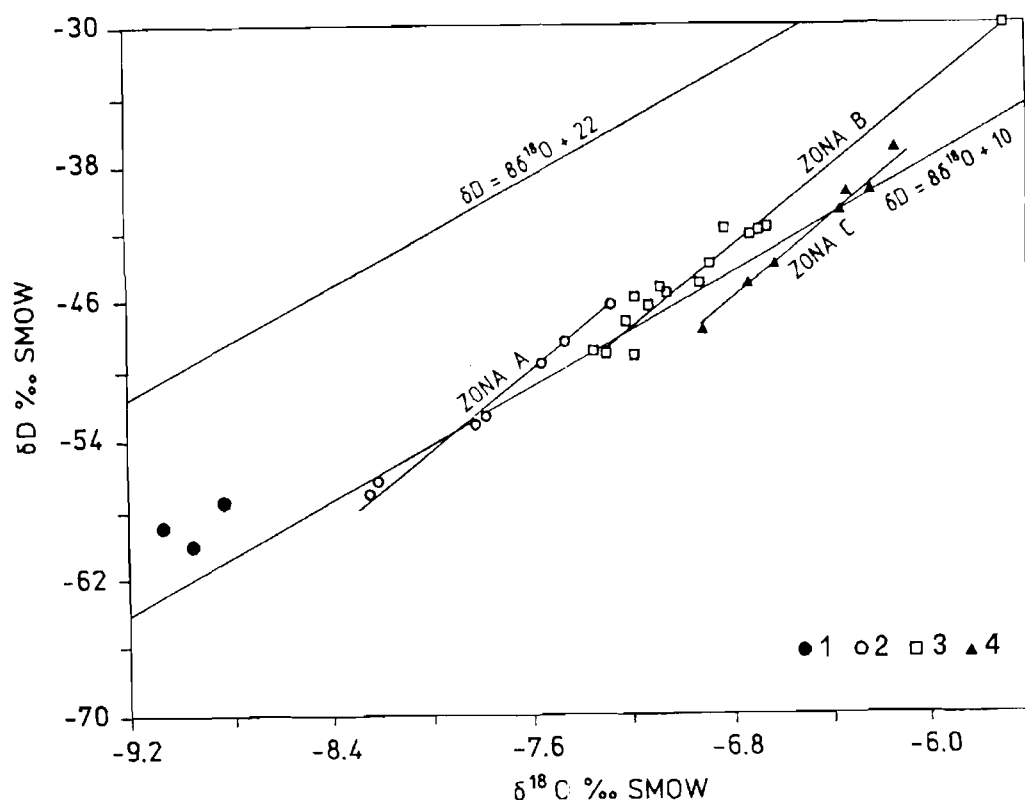


Fig. 2 - Composizione isotopica delle acque dei livelli sabbiosi del Tavoliere a confronto con quelli relativi alle acque sotterranee dell'acquifero carbonatico della Murgia (da TULIPANO et alii (1990) e da COTECCHIA et alii, 1995, modificata). 1) acque dei livelli sabbiosi del Tavoliere; 2-3-4) acque sotterranee rispettivamente delle zone A, B e C, della Murgia, delimitate in Fig. 4.

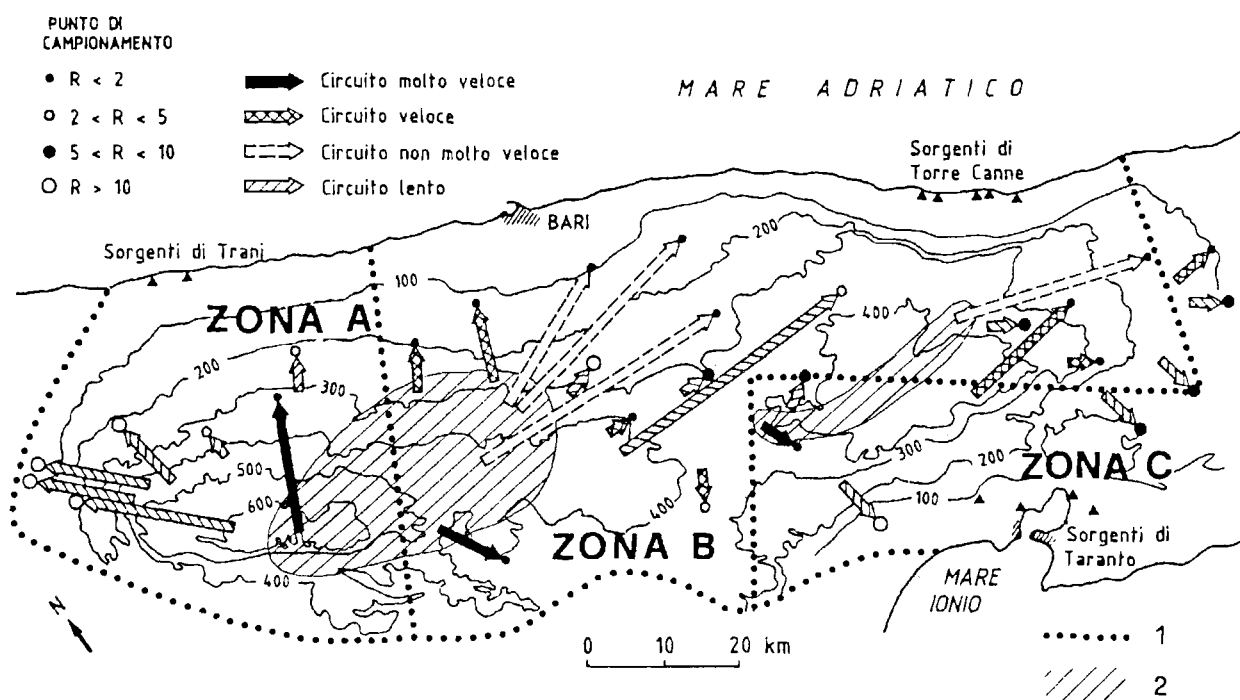


Fig. 3 - Grado di maturità, velocità relativa e aree di alimentazione delle acque sotterranee della Murgia (da TULIPANO et alii, 1990, modificata). 1) Limite delle zone; 2) Area di prevalente alimentazione.

zona si può mettere in relazione ad una differente quota a cui avviene l'infiltrazione e, di conseguenza, è possibile individuare la probabile area di alimentazione delle acque sotterranee. Discutendo questi risultati, unitamente al rapporto

$$R = \frac{\Delta Sr^{2+} \%}{\Delta (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \%}$$

riguardante le variazioni percentuale sia della somma ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) che dei contenuti in Sr^{2+} delle acque murgiane, TULIPANO et alii (1990) hanno individuato le aree di alimentazione e le velocità relative dei principali circuiti idrici sotterranei (Fig. 3).

A letto dell'unità idrogeologica del Tavoliere si rinviene una formazione argillosa plio-pleistocenica, potente alcune

circolazione estremamente lenta delle acque sotterranee in tale zona riconduce a circa 20.000 anni fa il periodo di infiltrazione, in coincidenza con la glaciazione Würmiana (COTECCHIA et alii, 1995).

Nella **Penisola Salentina**, in particolare nell'area della sorgente Chidro, le acque di falda, datate con il metodo del carbonio-14, mostrano un incremento dell'età stessa con la profondità: infatti i livelli d'acqua più antichi sono quelli più profondi. Tra 86 m e 120 m dal piano campagna le età variano da 3.100 a 42.000 anni, mentre 2.200 anni sono riferiti alle acque della sorgente Boraco, a 4 km circa ad ovest dalla sorgente Chidro (Fig. 4). Le età rilevate indicano una lunga permanenza delle acque di falda nell'acquifero; l'unica eccezione è mostrata dalla presenza di un livello a 69 m dal piano campagna del pozzo CH le cui acque risultano relativamente giovani (500 anni

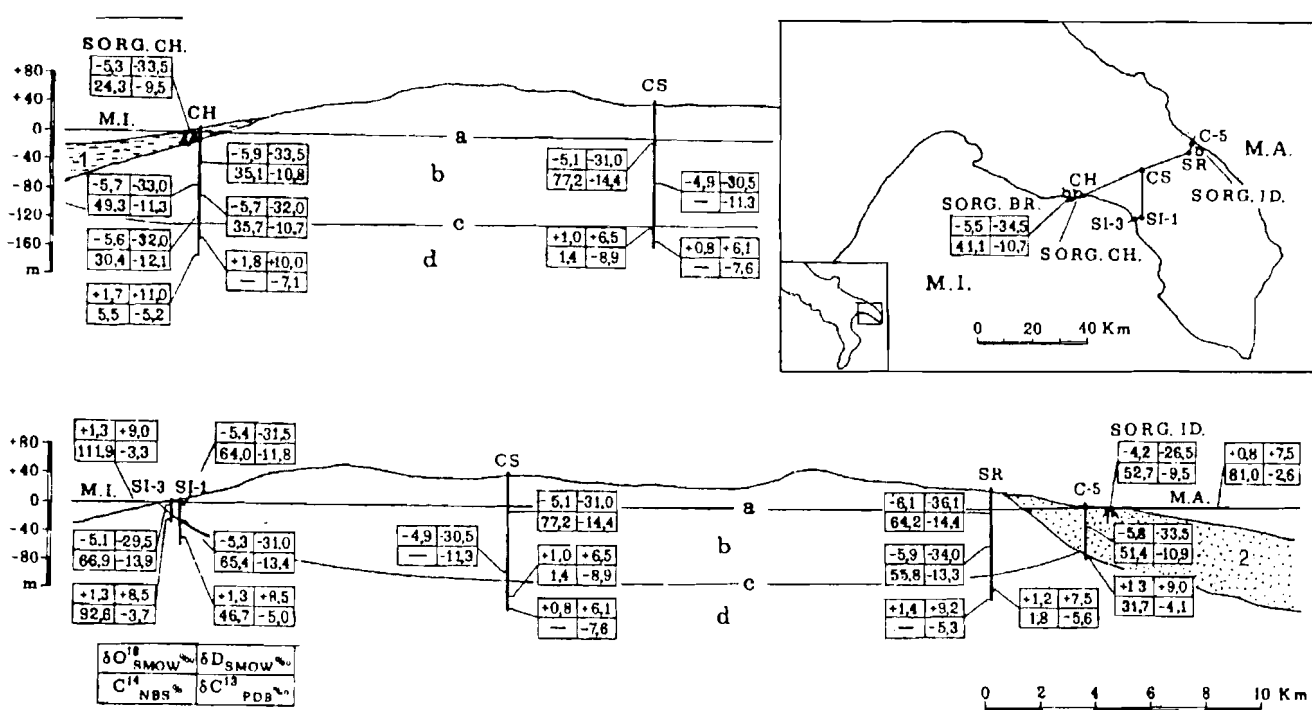


Fig. 4 - Ubicazione dei pozzi e delle sorgenti con l'indicazione dei dati isotopici (da COTECCHIA, 1975, semplificata). M.I.) Mar Ionio; M.A.) Mare Adriatico; a) superficie piezometrica; b) acque di falda dolci o salmastre; c) interfaccia; d) acque marine sotterranee; BR) sorgente Boraco; CH) sorgente Chidro; ID) sorgenti Idume.

migliaia di metri. Nell'ambito di questa formazione si rinviene un acquifero sabbioso o sabbioso-limoso, diffusamente artesiano. In particolare, nell'area compresa tra Foggia e Ortanova, sono stati riscontrati, a quote variabili tra i 200 e 400 m sotto il livello del mare, dei livelli sabbiosi contenenti acque più o meno dolci (salinità compresa tra 0,4 e 1,5 g/l). La determinazione del contenuto in carbonio-14 ha permesso di datare tali acque nell'intervallo 16.500-27.000 anni (COTECCHIA et alii, 1995).

La composizione in isotopi stabili delle acque circolanti nei livelli sabbiosi profondi del Tavoliere risulta caratterizzata da valori più bassi rispetto a quelli registrati nelle acque sotterranee dell'acquifero carbonatico della Murgia nord-occidentale (Fig. 2). Sulla base dei suddetti dati isotopici si conviene che la

circa), indice di un probabile miscelamento delle acque della falda profonda con acque attuali di alimentazione. Altro esempio da annoverare riguarda la zona di S. Isidoro dove i valori di ^{13}C (espressi in differenza ‰ rispetto allo standard PDB, rappresentato da una belemnite appartenente ad una serie giurassica americana) mostrano un ricambio più o meno accentuato dell'acqua di invasione continentale con quella di mare attuale. Per quanto riguarda la localizzazione delle aree di alimentazione, impiegando gli isotopi ^{18}O e D , sono state individuate aree in cui l'infiltrazione delle acque sotterranee avviene velocemente e aree in cui la scarsa permeabilità del terreno rallenta l'infiltrazione delle acque, causando un marcato frazionamento isotopico (COTECCHIA, 1975).

3.3.2 Misura del contenuto in radon-222 nelle acque sotterranee

Lo studio della concentrazione del radon nelle acque sotterranee risulta abbastanza difficoltoso in quanto la sua presenza è influenzata dalla natura litologica dell'acquifero, dalle condizioni tettoniche, dalla pressione atmosferica, dalla temperatura e dal contenuto salino delle acque. Ciò nonostante il radon è considerato un utile tracciante naturale per alcune sue peculiari capacità: infatti, essendo un "gas nobile" (o "inerte"), non interagisce con alcuna specie chimica presente nei terreni attraversati e, inoltre, è noto ed è apprezzato che la sua concentrazione nelle acque sotterranee varia in funzione del tenore di radio delle rocce. Dalle misure del contenuto in radon nelle acque si possono ricavare, almeno in particolari condizioni idrogeologiche, utili indicazioni sulla mobilità delle acque sotterranee.

Risultati

Le prime determinazioni del contenuto in radon, effettuate in numerose località pugliesi da MAGRI & TAZIOLI (1968) e nel seguito descritte, hanno riguardato sia acque sotterranee, sia acqua di intrusione marina.

Le analisi delle acque delle sorgenti drenanti la "falda profonda" del Gargano hanno mostrato una maggiore radioattività nella zona di Vieste-Testa del Gargano, raggiungendo anche valori di 3230 pCi/l; minore invece nella zona di Manfredonia-Siponto e dei laghi di Lesina e Varano. I più alti valori di radon possono essere spiegati ipotizzando un maggior contenuto di radio nelle formazioni calcaree e dolomitiche affioranti nel Gargano orientale, anche se i carotaggi della radioattività gamma naturale, eseguiti in pozzi fino alla profondità di 200 m dal piano campagna, non hanno confermato ciò. Altra ipotesi più accreditata è che i più alti valori di radon siano da collegarsi alla presenza di un debole massimo magnetico e di un cospicuo massimo di una grande anomalia gravimetrica positiva, in-

dice di un avvicinarsi alla superficie di materiale molto denso.

Nell'area a circa 12 km a nord di Lecce sono presenti importanti manifestazioni idriche, denominate **sorgenti Idume**, costituite essenzialmente da polle, localizzate al fondo di canali (Canale Rauccio e Canale Grande). In tale area le misure del contenuto in radon delle acque sotterranee hanno registrato un valore medio pari a 1020 pCi/l, dimostrando che le stesse attraversano terreni ricchi di radio, mentre le acque della scaturigine principale hanno presentato valori di radon elevati, dell'ordine di 3000 pCi/l, da associarsi ad una elevata mobilità della falda idrica.

A circa 42 km a SE di Taranto è presente una rilevante manifestazione sorgentizia, nota come **sorgente Chidro**, costituita da una serie di scaturigini superficiali e subacquee che defluiscono a mare attraverso il Canale S. Nicola. Le misure del contenuto in radon sono state condotte sia direttamente sulla sorgente, sia in pozzi trivellati nella zona (CH-1 e CH-2) (Fig. 5). Le acque drenate dalle scaturigini più importanti hanno mostrato contenuti in radon di 1210 e 1420 pCi/l, mentre i

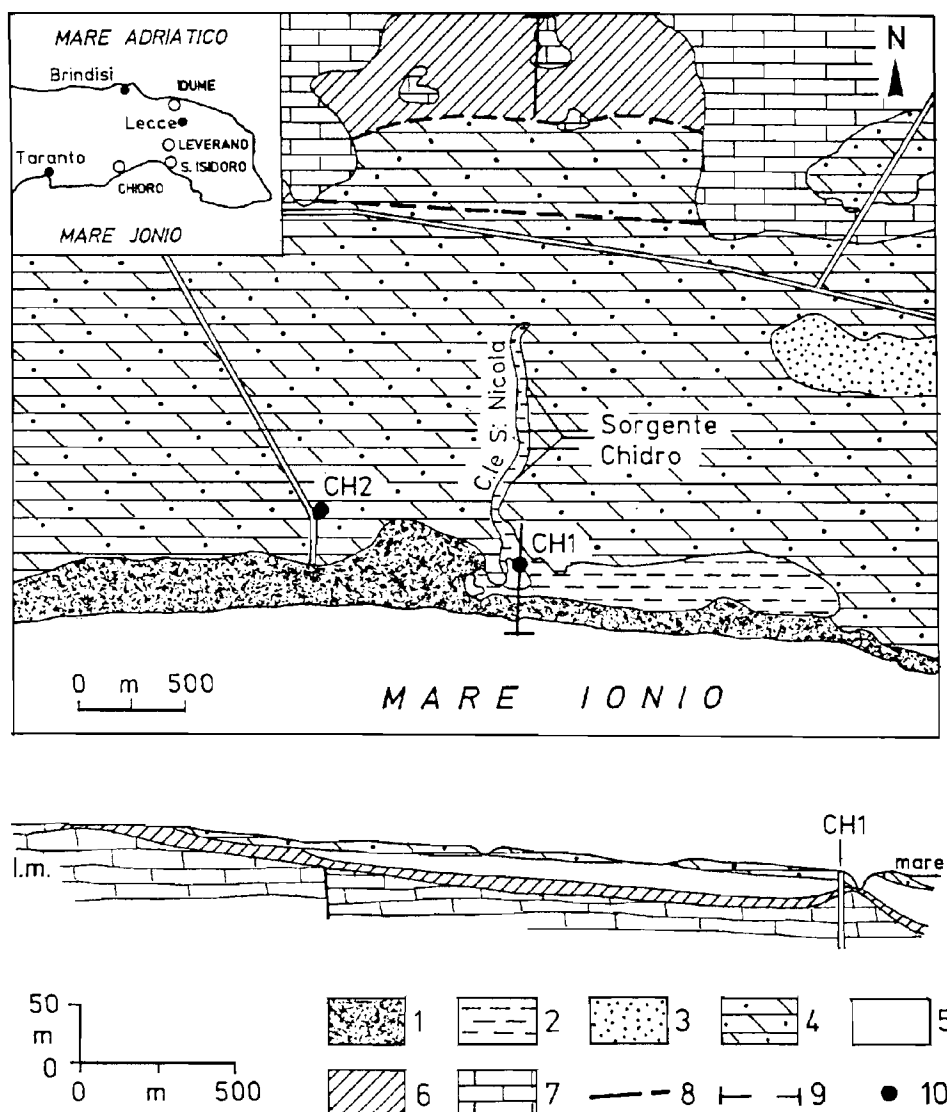


Fig. 5 - Carta geologica e sezione della zona della sorgente Chidro (Taranto) (da COTECCHIA et alii, 1973, semplificata). 1) dune costiere e spiagge attuali; 2) depositi alluvionali palustri; 3) depositi dunari consolidati; 4) calcareniti; 5) argille e argille sabbiose; 6) calcari bioclastici e calcareniti; 7) calcari e calcari-dolomitici; 8) tagli (sicure o probabili); 9) traccia di sezione; 10) pozzi.

contenuti rilevati in corrispondenza di scaturigini minori sono stati dell'ordine di 400 pCi/l. Nel pozzo CH-1 sono stati riscontrati tenori alti di radon (circa 1300 pCi/l), mentre tenori più bassi pari a 350 pCi/l, riscontrati nel pozzo CH-2, denotano una scarsa mobilità della falda (COTECCHIA et alii, 1973).

Misure in acque della falda idrica del **Tavoliere** hanno mostrato valori del contenuto in radon oscillanti tra un minimo di 30 pCi/l e un massimo di 850 pCi/l. Il tenore medio, pari a 210 pCi/l, è risultato nettamente inferiore a quello misurato nei pozzi in rocce calcaree della zona delle sorgenti Idume (1020 pCi/l). Ciò è spiegabile in virtù del minore tenore in radio dei terreni costituenti l'acquifero poroso del Tavoliere.

Per la falda idrica superficiale di **Leverano** (Lecce), di tipo sospeso, le misure del contenuto in radon sono state nettamente inferiori a 30 pCi/l, in conseguenza sia dei tenori esigui di radio delle sabbie limose che costituiscono l'acquifero sia della scarsa mobilità delle acque di falda.

Nella Penisola Salentina, in prossimità delle sorgenti Chidro, S. Isidoro e Idume, sono state effettuate misure del contenuto in radon dell'**acqua di mare** di invasione continentale: i valori registrati sono stati molto bassi (inferiori a 80 pCi/l), eccetto nella zona delle sorgenti Idume a circa 1,4 km dalla costa, dove le concentrazioni in radon hanno raggiunto valori relativamente alti (860 pCi/l).

Di recente sono state effettuate misure, diffuse sull'intero territorio pugliese, della concentrazione del radon (TADOLINI et alii, 1995; TADOLINI & SPIZZICO, 1996; TADOLINI et alii, 1996). In Fig. 6 sono riportati in modo schematico i differenti valori relativi alle determinazioni del contenuto in

radon nelle principali sorgenti sgorganti lungo la costa pugliese.

Nella zona compresa tra T. Columenae e P. Cesareo (Lecce) sono stati circoscritti dei settori aventi differenti valori della concentrazioni in radon a cui si dimostrano corrispondere diverse caratteristiche di mobilità delle acque di falda (TADOLINI et alii, 1995): settore con basso contenuto in radon, le cui concentrazioni sono comprese tra 50 e 400 pCi/l, indice di una bassa mobilità delle acque; settore con contenuto in radon relativamente basso, con valori compresi tra 100 e 900 pCi/l; settore con medio contenuto in radon, con concentrazioni comprese tra 800 e 1900 pCi/l; settore in cui le acque presentano elevati valori di concentrazioni in radon, generalmente compresi tra 2100 e 12000 pCi/l, e la cui mobilità risulta elevata per effetto di influenze che le variazioni periodiche e aperiodiche del mare esercitano sui deflussi idrici sotterranei.

A nord di Brindisi, tra Torre Guaceto e Punta Penna Grossa, in una porzione dell'acquifero profondo in cui le acque sotterranee dolci circolano in pressione, TADOLINI et alii (1996) hanno correlato le variazioni di concentrazione del contenuto in radon con le variazioni del livello del mare. I risultati ottenuti, pur essendo di non facile e lineare interpretazione, hanno permesso di formulare le seguenti conclusioni. Durante la fase di discesa del livello del mare la concentrazione di radon delle acque sotterranee tende ad aumentare. Ciò si spiega in quanto il deflusso delle acque di falda è favorito dalla diminuzione del livello base delle acque sotterranee, con conseguente aumento della mobilità delle stesse. L'innalzamento del livello del mare determina una diminuzione della mobilità delle acque in quanto crea un effetto "tampone" alla venuta a giorno

delle acque sotterranee che, di per se, giustifica una riduzione della concentrazione di radon. Inoltre, tale effetto è enfatizzato dall'intrusione di acqua marina e dal miscelamento di questa. a concentrazione in radon bassissima, con le acque sotterranee.

L'incremento della concentrazione in radon può essere dovuto infine all'attività antropica, quando gli emungimenti intensi e concentrati, come quelli irrigui, determinano una maggiore mobilità della falda (TADOLINI et alii, 1996). Tali effetti possono sovrapporsi a quelli naturali, legati all'azione delle maree, fino ad annullarne gli effetti, complicando non poco l'interpretazione delle misure.

In linea generale, sulla base dei risultati delle misure del contenuto in

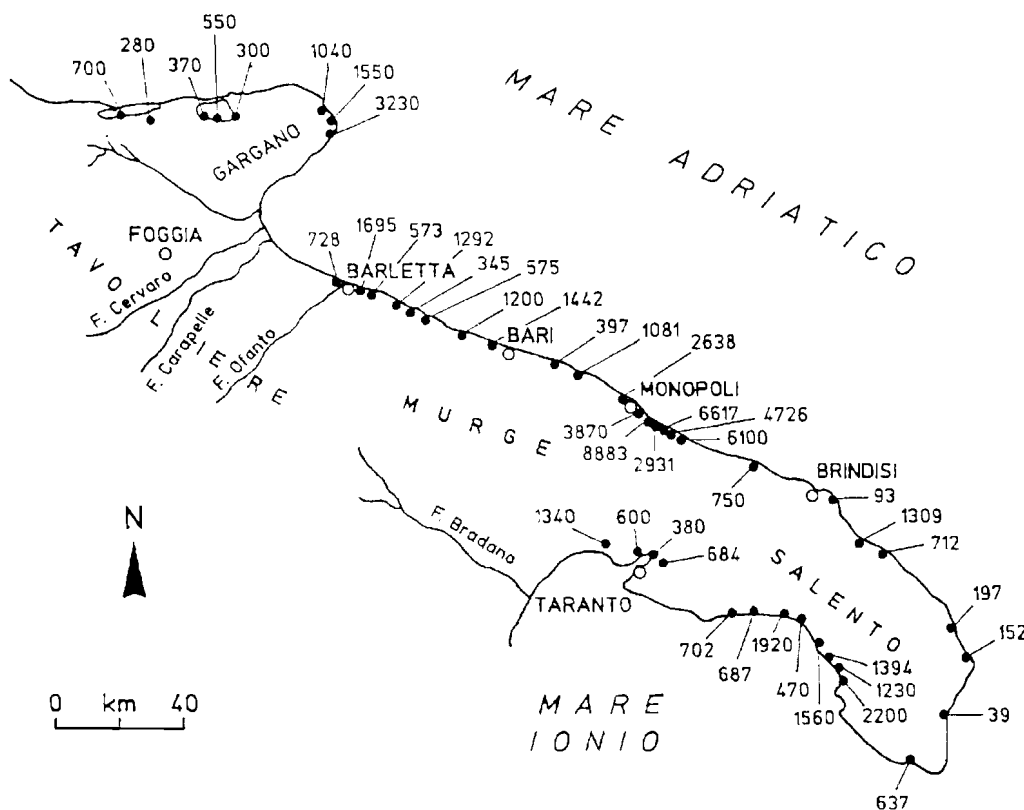


Fig. 6 - Valori relativi alle determinazioni del contenuto in radon nelle principali sorgenti sgorganti lungo la costa pugliese (da TADOLINI & SPIZZICO, 1996, semplificata).

radon in acque sotterranee della Puglia, appare quindi chiaro che:

- in presenza di livelli rocciosi permeabili ricchi in radio, il radon può fungere da tracciante e contribuire alla risoluzione di problemi idrogeologici;
- in acquiferi carbonatici, che presentano una distribuzione sufficientemente omogenea di radio, il contenuto in radon è maggiore dove le acque sotterranee sono più mobili.

3.3.3 Misura della velocità di filtrazione con diluizione di un tracciante in un pozzo singolo

La velocità di filtrazione dell'acqua sotterranea può essere facilmente determinata immettendo un tracciante in un pozzo e misurandone, dentro lo stesso pozzo, la variazione di concentrazione nel tempo; naturalmente la variazione di concentrazione è tanto più rapida quanto più l'acqua fluisce veloce. Tale determinazione fornisce utili indicazioni sulla permeabilità e sulla trasmissività dell'acquifero (COTECCHIA & PIRASTRU, 1969).

Il metodo si basa sulla relazione esistente tra la velocità con cui un tracciante immesso in un pozzo si diluisce e la velocità di filtrazione dell'acqua sotterranea. La velocità di filtrazione $v(t)$, espressa in cm/s, è legata alla diluizione del tracciante, che avviene con legge esponenziale, secondo la formula (MOSETTI, 1961):

$$v(t) = - V/\alpha St * \ln C/C_0$$

dove V è il volume di acqua relativo al tratto del pozzo in cui si effettua la misura (cm^3), α è un coefficiente di correzione che tiene conto della distorsione dei filetti idrici provocata dal pozzo, S è la sezione del pozzo normale alla direzione di flusso dell'acqua (cm^2), t è l'intervallo di tempo durante il quale si svolge la misura (s) nonché C_0 e C , rispettivamente, sono la concentrazione del tracciante all'inizio e alla fine della misura (Ci/cm^3).

Il coefficiente di correzione rappresenta in pratica il rapporto tra la portata attraverso il pozzo e quella che si ha nell'acquifero per una stessa sezione; tale coefficiente, calcolato per ogni singolo pozzo e per tutta la lunghezza della colonna idrica, dipende dalla geometria del perforo, dalle caratteristiche delle tubazioni di rivestimento utilizzate e dalle caratteristiche chimico-fisiche delle acque (DROST et alii, 1968).

a) Tecniche di misura

La misura della velocità di filtrazione può essere effettuata sia direttamente che indirettamente a seconda che si impieghino traccianti rilevabili in sito o che richiedano il campionamento e successive determinazioni in laboratorio.

Il primo metodo è il più usato perché permette di effettuare misure più corrette e più pratiche. Qualora si effettuano misure a profondità notevoli e non è possibile impiegare i comuni strumenti di rivelazione, si procede con il metodo indiretto. L'immissione del tracciante si effettua con speciali bottiglie, con siringhe di immissione o con piccole pompe, operando su dei tratti di pozzo in precedenza selezionati. La durata di una misura dipende ovviamente dalla velocità di filtrazione della falda acquifera e dal diametro del pozzo (DROST et alii, 1968).

Il tracciante largamente impiegato è stato il *cloruro di cadmio biidrato*, $\text{CdCl}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$, in quanto presenta una sezione di cattura più grande rispetto agli altri sali e può essere misurato fino a concentrazioni di 0,005 g/l circa (COTECCHIA & PIRASTRU, 1969).

Di recente, invece, anche l'impiego dello *ioduro di potassio* (KI) come tracciante ha mostrato buoni risultati. La soluzione contenente tale sale viene immessa nei pozzi in esame mediante bottiglie aperte dalla superficie per mezzo di un messaggero. La concentrazione iniziale della soluzione immessa è tale da ottenere, per i tratti marcati della colonna idrica, una concentrazione iniziale di ione ioduro equivalente in media a 300-400 mg/l. Successivamente all'immissione del tracciante le concentrazioni dello iodio, lungo l'intera colonna idrica, vengono rilevate, ad intervalli di tempo prefissati (ad esempio 1h, 3h, 24h, 48h, 72h), in funzione delle condizioni idrogeologiche locali. Mediante un'apposita sonda, si realizza un carotaggio verticale della concentrazione di ioduro di potassio, con una sensibilità pari a 1 mg/l ed una precisione di $\pm 3\%$ (SPIZZICO, 1998).

b) Esempi di applicazione

Nell'ambito delle ricerche idrogeologiche della Puglia, il metodo per la misura della velocità di filtrazione in pozzo singolo è stato applicato in acquiferi permeabili sia per fessurazione che per porosità. Si è notato che in terreni fessurati la prospezione è possibile anche per livelli idrici di decine di metri di spessore, mentre in terreni permeabili per porosità è necessario condurre le misure su tratti molto limitati di pozzo, che devono essere isolati tra di loro da "packer" pneumatici per eliminare l'effetto delle correnti verticali (TAZIOLI, 1973).

In particolare, misure di velocità di filtrazione, con il metodo della diluizione di un tracciante in un pozzo singolo, hanno riguardato sia le falde profonde che quelle superficiali della Puglia.

Nella zona delle sorgenti Idume (Fig. 7) sono state condotte misure della velocità di filtrazione in assenza di correnti verticali nel pozzo SR, profondo circa 150 m e posto a circa 5 km dalla costa. Valori relativamente alti della velocità di filtrazione sono stati riscontrati nel tratto da 58 m a 75 m (in media circa 11 cm/giorno) (Fig. 8), dove è presente un livello interessato da ampie fratture di origine carsica. Al di sopra, dove la roccia è meno permeabile, la velocità di filtrazione scende bruscamente a valori dell'ordine dei 2-3 cm/giorno. Nel pozzo C5, profondo circa 75 m e posto a circa 1,4 km dalla costa, l'acqua di mare che è contenuta nei calcari di base presenta una velocità di filtrazione abbastanza alta in profondità, circa 67 cm/giorno (Fig. 9), anche se, in realtà, non si tratta di velocità effettiva della falda, in quanto le misure sono state effettuate in presenza di correnti verticali (TADOLINI et alii, 1971).

Relativamente alle falde superficiali pugliesi, si è visto che le misure della velocità di filtrazione variano fortemente e bruscamente da pochi centimetri a molti metri al giorno: questo perché, in accordo con le osservazioni geolitologiche, l'acquifero in rocce post-cretacee è costituito da un insieme di livelli ad irregolare distribuzione della permeabilità in senso verticale ed orizzontale. I maggiori valori della velocità di filtrazione sono stati riscontrati nel livello calcarenitico glauconitico-fosfatico, che rappresenta vie preferenziali di deflusso, create dalla dissoluzione carsica. In particolare nel pozzo C5, in corrispondenza del predetto livello, la massima velocità di filtrazione registrata

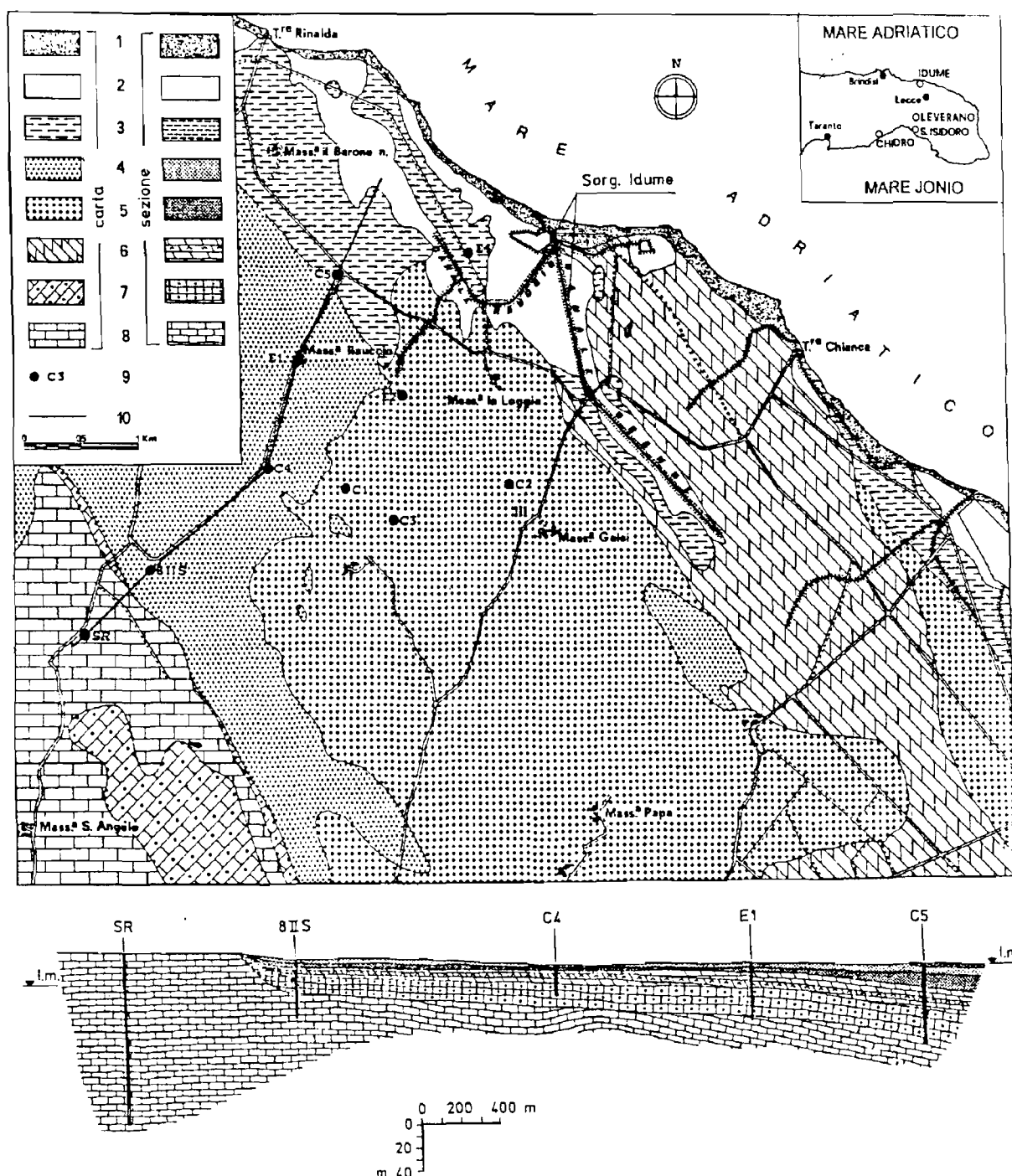


Fig. 7 - Carta geologica e sezione della zona delle sorgenti Idume (Lecce) (da TADOLINI et alii, 1971, modificata). 1) spiagge e dune attuali; 2) sabbie e limi palustri recenti; 3) calcareniti giallastre, molto fossilifere; 4) calcareniti e calciruditi giallo rossicce, molto fossilifere; 5) calcareniti e calciruditi biancastre ben diagenizzate; 6) calcari dolomitici grigiastri, generalmente carsificati, con frequenti passaggi laterali e verticali a calcareniti e calciruditi, calcareniti glauconitico-fosfatiche (orizzonte guida); 7) calcareniti marnose, compatte, grigie superiormente, giallo paglierino inferiormente; 8) calcari a grana fina biancastri, calcari dolomitici grigiastri, stratificati, fessurati, interessati da fenomeni carsici diffusi; 9) pozzi; 10) traccia di sezione.

è stata di circa 18 m/giorno. I vari strati acquiferi si associano, nell'ambito della stessa falda idrica, a carichi piezometrici diversi; per questo si determinano, lungo la colonna idrica dei sondaggi, correnti verticali. In Fig. 9 si può notare infatti che una corrente discendente, al di sopra del livello glauconitico, raggiunge la velocità massima di circa 55 cm/minuto, mentre una corrente ascendente, al di sotto dello stesso livello, raggiunge la velocità di circa 15 cm/minuto. Ne consegue che il livello

glauconitico opera un forte drenaggio dall'alto e, secondariamente, dal basso, sottraendo complessivamente una quantità di acqua valutabile in circa 1,300 l/ora (TADOLINI et alii, 1971).

3.3.4 Misura delle correnti verticali

Le correnti verticali nei pozzi sono generalmente causate

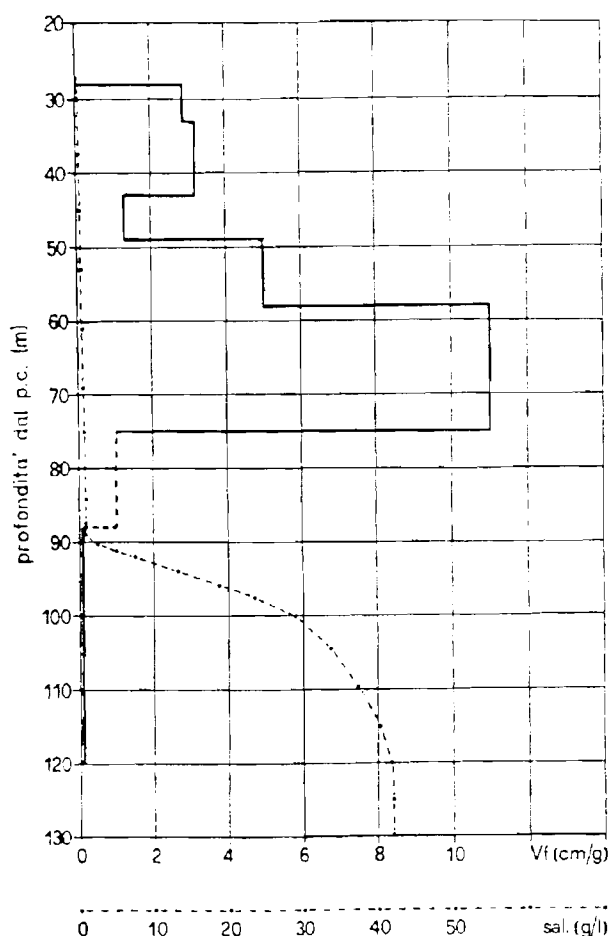


Fig. 8 - Andamento della velocità di filtrazione e del contenuto salino nel pozzo SR, perforato nei calcari e calcari dolomitici (ubicato in Fig. 2) (da TAZIOLI, 1973).

da differenze di carico piezometrico tra due o più livelli acquiferi messi in comunicazione dalla trivellazione.

Il fenomeno è da ritenersi importante anche in acquiferi fessurati; infatti le numerose indagini eseguite nella Penisola Salentina, dove la falda circola diffusamente a pelo libero, hanno evidenziato la presenza di correnti verticali in numerosi sondaggi.

Determinare la presenza e l'entità delle correnti verticali è utile in quanto permette di accertare interscambi tra falde diverse o fra diversi livelli idrici di una stessa falda. Tali conoscenze sono utili per procedere all'opportuna sistemazione di pozzi, adibiti a scopi particolari o realizzati in situazioni in cui le acque sotterranee risultano particolarmente vulnerabili, per ottenere l'isolamento temporaneo o definitivo di particolari livelli idrici, per l'acquisizione di parametri idrogeologici (TAZIOLI, 1973).

a) Tecniche di misura

La determinazione delle correnti verticali nei pozzi viene effettuata con immissioni puntiformi di tracciante alla profondità in cui si presume, in base ai dati stratigrafici, l'esistenza delle correnti stesse, seguendo il movimento della "nuvola" tracciante con un contatore Geiger-Müller o con un rivelatore a scintillazione (Fig. 10).

La velocità (V_v) delle correnti verticali si calcola secondo la formula

$$V_v = x / t$$

dove x rappresenta il percorso effettuato dalla nube tracciante nel tempo t , lungo la verticale del pozzo (TAZIOLI, 1986).

Informazioni più precise si ottengono registrando il passaggio della nuvola tracciante con dei rivelatori disposti in punti fissi lungo la verticale del pozzo con il metodo del "doppio

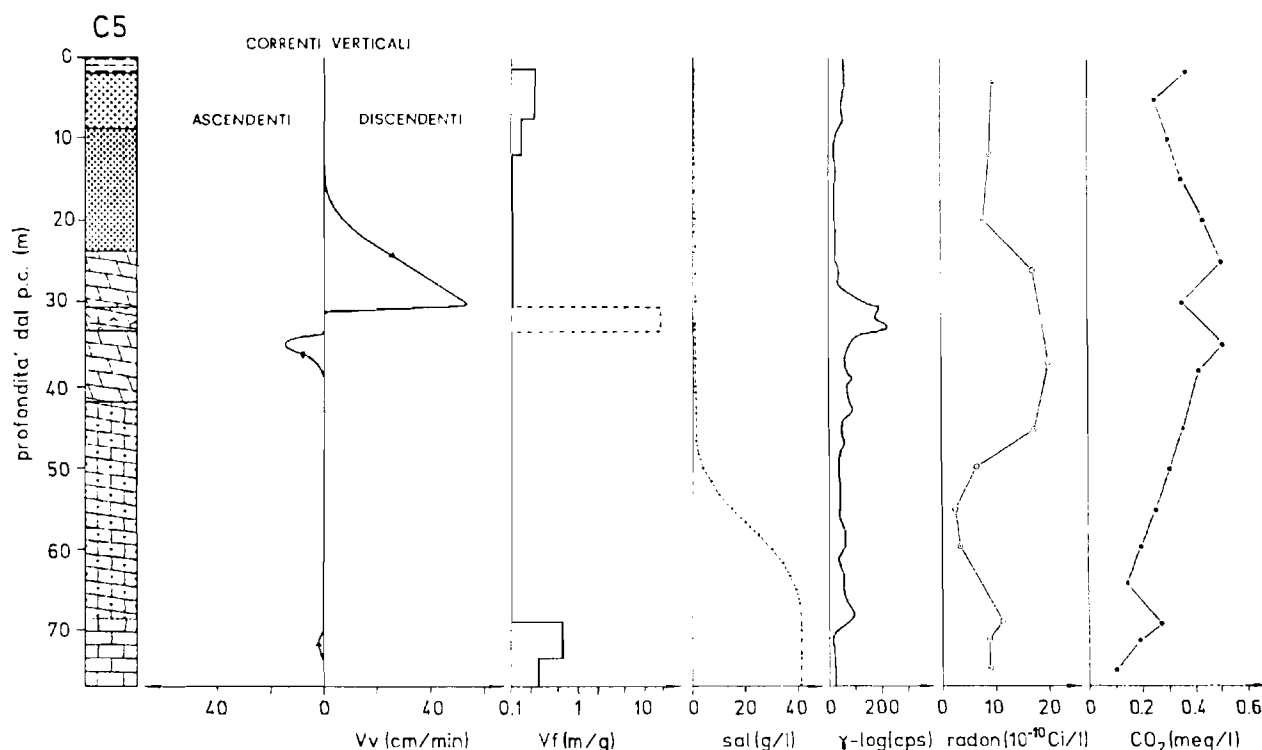


Fig. 9 - Andamento delle correnti verticali (V_v), della velocità di filtrazione (V_f), del contenuto salino (g/l), della radioattività naturale dell'acquifero (g-log), dei contenuti in radon (Ci/l) e in CO_2 misurati nel pozzo C5 (ubicato in Fig. 2, dove compare la legenda per la stratigrafia) (da TADOLINI et alii, 1971).

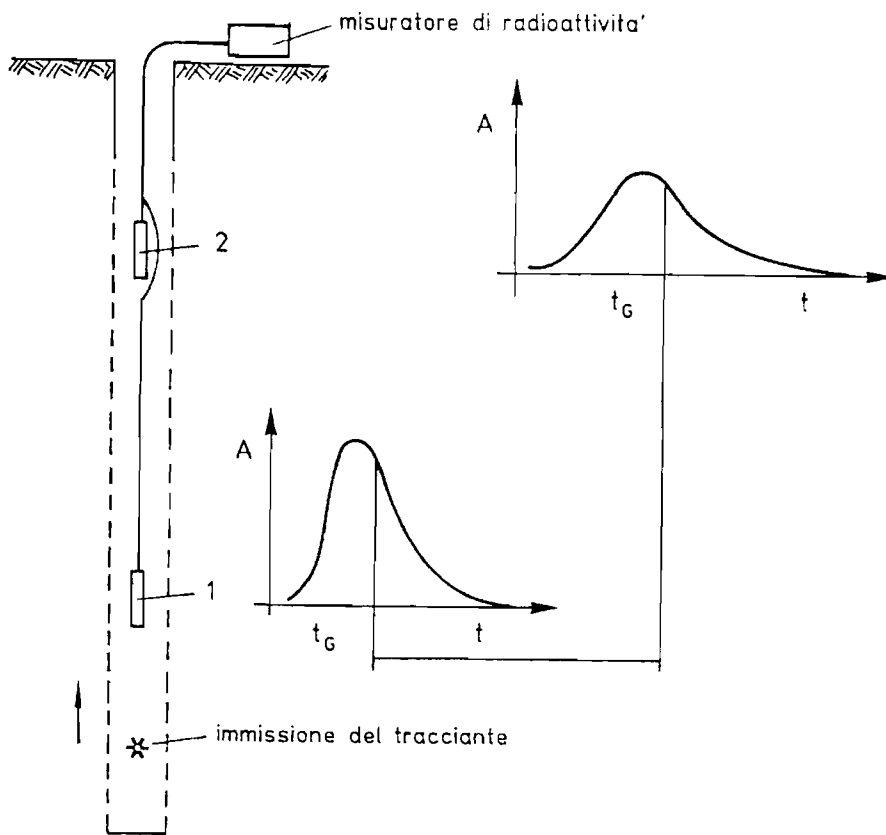


Fig. 10 - Esempio di misura delle correnti verticali in pozzo mediante immissione puntiforme di tracciante emettente radiazioni gamma e misura della velocità della nube mediante rivelatori disposti a distanza nota lungo la verticale del pozzo (da TAZIOLI, 1986). A) attività del tracciante; t_G) tempo relativo al passaggio del baricentro della nuvola tracciante.

picco", o ancora per mezzo di un solo rivelatore con il metodo del "conteggio totale" (istante per istante si registra l'attività della nuvola che passa davanti al rivelatore).

A seconda delle condizioni idrogeologiche incontrate e del tipo di indagine che deve essere condotta si può utilizzare o l'uno o l'altro metodo.

Il metodo del "doppio picco" permette di effettuare, con discreta precisione, misure di velocità media tra punti contigui nella direzione del flusso verticale; di contro è necessario un elevato numero di rivelatori per ottenere una distribuzione dettagliata della velocità lungo la colonna idrica.

Il metodo del "conteggio totale" invece offre la possibilità di rivelare anche componenti orizzontali del flusso fra due punti di misura disposti lungo il pozzo; ad esempio, nel caso in cui vi sia afflusso ed efflusso di una uguale quantità di acqua, la portata lungo il foro resta invariata con conseguente diminuzione del conteggio totale, proporzionale alla avvenuta diluizione del tracciante. Tale metodo risulta utile per integrare le informazioni fornite dal primo metodo.

E' da osservare che la misura delle correnti verticali di debole entità può richiedere molto tempo e la precisione dei dati ottenuti con i due metodi viene di norma influenzata dalla diffusione del tracciante durante lo spostamento lungo la verticale del pozzo. Tale inconveniente si supera aumentando artificialmente la velocità della corrente verticale ricorrendo ad un dispositivo che riduce la sezione del sondaggio.

Per questi scopi i traccianti radioattivi più idonei si sono mostrati essere lo iodio-131 ed il bromo-82, mentre tra i trac-

cianti stabili è stato utilizzato il cloruro di cadmio in soluzione alcolica (TAZIOLI, 1973).

b) Esempi di applicazione

La determinazione delle correnti verticali nei pozzi ha permesso di risolvere problemi inerenti alla circolazione idrica sotterranea, consentendo di individuare vie preferenziali di deflusso di livelli acquiferi più produttivi e di procedere ad una adeguata sistemazione dei pozzi per misure di temperatura e salinità.

Un esempio indicativo riguarda l'andamento delle correnti verticali registrato nei pozzi C5 e C1: quest'ultimo è profondo 60 m e posto a circa 2,8 km dalla costa (Fig. 7). In Fig. 9, relativa al pozzo C5, le correnti verticali mostrano senso opposto manifestando l'esistenza di una via preferenziale di deflusso orizzontale. In Fig. 11, relativa al pozzo C1, la corrente verticale discendente evidenzia sia una differenza di carico idraulico fra due livelli acquiferi in terreni calcarei fessurati sia che il carico della falda idrica superficiale è maggiore di quello della falda profonda (TAZIOLI, 1973).

3.3.5 Misura della direzione dei deflussi sotterranei in un pozzo singolo

La misura della direzione dei deflussi sotterranei è utile soprattutto nelle falde costituite da diversi livelli idrici, caratterizzati da differenti carichi piezometrici; infatti, in ognuno di essi la direzione di deflusso dell'acqua può presentare direttrici differenti. Tali misure si possono ritenere attendibili soltanto se riferite ad aree di modesta estensione attorno al pozzo in esame.

a) Tecniche di misura

Il metodo, presentato da MAIRHOFER (1963) e successivamente perfezionato da altri autori (BOROWCZYK et alii, 1965; DROST et alii, 1968; HALEY et alii, 1970), prevede l'immissione alla quota di ispezione, in un unico pozzo, di una certa quantità di tracciante emettitore gamma, e l'attesa che l'acqua, così marcata, fuoriesca dal pozzo in un tempo che dipende dalla velocità di filtrazione e dal diametro del pozzo. La direzione del flusso si rileva con una sonda a scintillazione collimata, misurando la direzione di massima attività. Tale procedura è realizzabile se la velocità di filtrazione è modesta.

Nel caso di elevate velocità di filtrazione, ai fini sempre di ricerche idrogeologiche in Puglia, risultati soddisfacenti sono stati ottenuti mediante l'impiego di un'apparecchiatura analoga a quella utilizzata da HAZZAA (1970). Essa è costituita da una corona circolare di tubi finestrati e riempiti di carbone attivo granulare il quale ha una elevata capacità di assorbire molti traccianti radioattivi e coloranti. Il tracciante viene immesso al centro della corona per mezzo di una siringa a comando elettromagnetico, mentre un piccolo tubo, fittamente perforato, rallen-

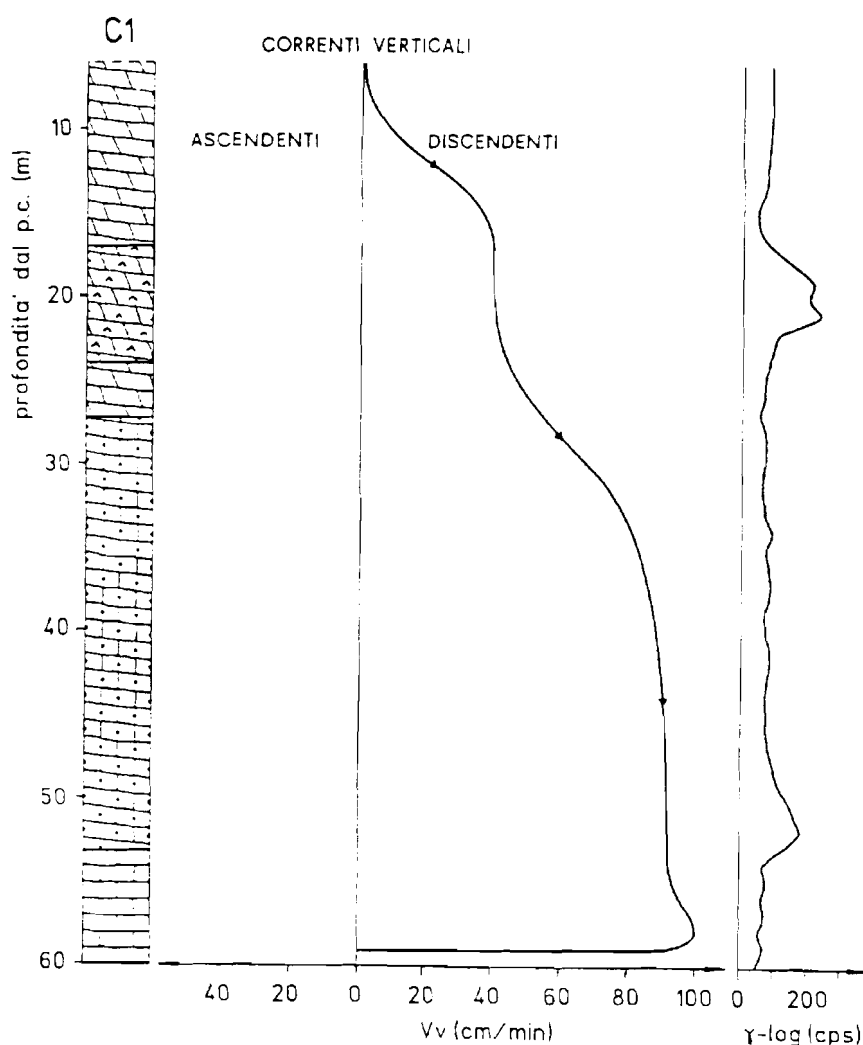


Fig. 11 - Velocità idrica verticale, positiva se verso il basso, e carotaggio della radioattività naturale dell'acquifero, relative al pozzo C1 (ubicato in Fig. 2, dove compare la legenda per la stratigrafia) (da TAZIOLI, 1973).

ta la fuoriuscita del tracciante stesso. Dopo un tempo sufficientemente lungo (generalmente è compreso tra qualche ora ed alcuni giorni) si estrae l'apparecchio dal pozzo e si misura l'attività dei singoli tubi mediante un rivelatore a scintillazione gamma: l'attività maggiore indicherà la direzione di deflusso della falda (TAZIOLI, 1973).

b) Esempi di applicazione

La misura delle direzioni dei deflussi sotterranei ha permesso di accertare la periodica inversione della direzione di deflusso delle acque di falda in mare, dovuta essenzialmente alle oscillazioni del livello del mare. In qualche caso è stato possibile anche notare un moto delle acque di mare di invasione continentale, dirette verso il continente in condizioni di alta marea

e verso la costa in condizioni di bassa marea.

In Fig. 12 sono rappresentate le direzioni di flusso ottenute in laboratorio, su modello idraulico (diagrammi A e B), ed in sito nel pozzo C5, a 33 m di profondità, impiegando lo iodio-131 come tracciante (MAGRI & TAZIOLI, 1968).

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia L'Ing. Michele Spizzico per i preziosi suggerimenti e la costruttiva revisione del manoscritto.

BIBLIOGRAFIA

- Borowczyk M., Crabczak J. & Zuber A. (1965)** - Radioisotope measurements of groundwater flow direction by the single-well method. *Nukleonika*, vol. X.
- Celico P. (1990)** - Prospezioni idrogeologiche - Ed. Liguori, vol. I e II.
- Cotecchia V. (1975)** - Metodologie di studio in acquiferi carbonatici fessurati, con particolare riferimento a quelli pugliesi (Italia). *Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque*, 29, 15-52.
- Cotecchia V. (1977)** - Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina). *Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle*

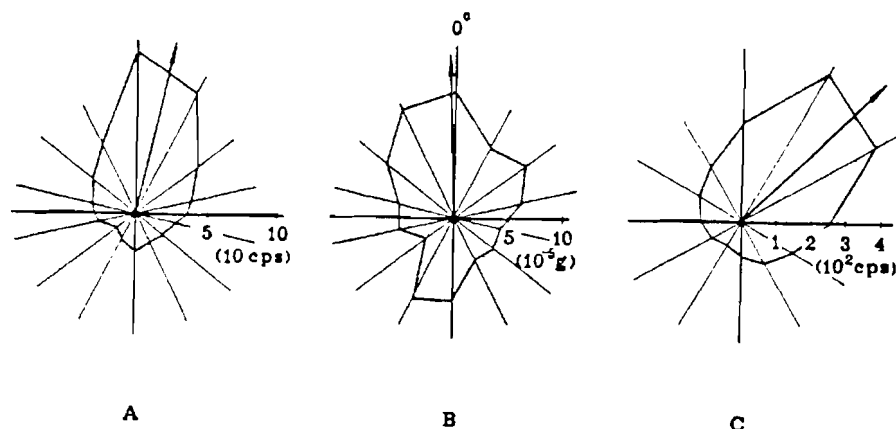


Fig. 12 - Diagrammi della direzione dei deflussi sotterranei ottenuti con il dispositivo a tubi riempiti di carbone attivo, impiegando come tracciante ^{51}Cr (A), fluoresceina (B) e ^{131}I (C). I diagrammi A e B riguardano misure effettuate in laboratorio su modello idraulico, il diagramma C una misura eseguita nel pozzo C5 a 33 m di profondità (ubicato in Fig. 2) (da MAGRI & TAZIOLI, 1968).

Acque, 20, 1-466.

Cotecchia V. (1992) - Gestione e salvaguardia delle acque sotterranee in Puglia. Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, n° 94.

Cotecchia V., Ferrari G., Fidelibus M.D., Polemio M., Tadolini T. & Tulipano L. (1995) - Considerazioni sull'origine e rinnovabilità delle acque presenti in livelli sabbiosi profondi del Tavoliere di Puglia. Il Conv. Naz. Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee. Modena 17-19 maggio 1995.

Cotecchia V. & Polemio M. (1998) - Apulian groundwater (Southern Italy) salt pollution monitoring network. 15th Salt Water Intrusion Meeting, Ghent, Belgium, 1998, in corso di stampa.

Cotecchia V. & Pirastrue. (1969) - Nuove prospettive per la misura nucleare di traccianti stabili (cadmio, boro) nelle acque sotterranee. Geol. Appl. e Idrogeol., IV, 149-159.

Cotecchia V., Tadolini T., Tazioli G.S. & Tulipano L. (1973) - Studio idrogeologico della zona della sorgente Chidro (Taranto). Atti Il Conv. Internazionale sulle Acque Sotterranee. Palermo, 28-29-30 aprile/1-2 maggio 1973.

Craig H. (1961) - Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. Science, 133.

Di Fazio A. (1997) - Uso di traccianti in studi sul campo. CNR-IRSA

Di Fazio A. & Benedini M. (1994) - Sulla determinazione sperimentale del fattore di ritardo in traccianti utilizzati dagli idrogeologi. Idrotecnica.

Di Fazio A. & Volterra L. (1994) - La clorofilla: un tracciante naturale per l'uso nell'idrologia delle acque profonde e di quelle superficiali. Ambiente Risorse Salute, 32, nov./dic..

Drost W., Klotz D., Koch A., Moser H., Neumaier F. & Rauert W. (1968) - Point dilution methods of investigating ground water flow by means of radioisotopes. Water Resources Research, vol. IV, n. 1.

Gaspere & Oncescu M. (1972) - Radioactive tracers in hydrology. Vol. 1, Ed. Academice Bucuresti, Romania.

Grassi D. (1973) - Fondamentali aspetti dell'idrogeologia carsica della Murgia (Puglia), con particolare riferimento al versante adriatico. Geol. Appl. e Idrogeol., VIII, parte II, 285-313.

Grassi D., Romanazzi L., Salvemini A. & Spilotro G. (1982) - Grado di evoluzione e ciclicità del fenomeno carsico in Puglia in rapporto all'evoluzione tettonica. Atti Il Simposio Internazionale sulla "Utilizzazione delle aree carsiche". Bari, 20-22 maggio 1982.

Haley E., Moser H., Zellhofer O. & Zuber A. (1967) - Borehole dilution techniques: a critical review. In: Isotope Hydrology, IAEA, Vienna 1967.

Hazzaa I.B. (1970) - Single-well technique using ^{32}P for determining direction and velocity of groundwater flow. In: Isotope Hydrology, IAEA, Vienna 1970.

IAEA (1962) - Application of isotope techniques in hydrology. Technical reports series n. 11, Vienna.

IAEA (1968) - Guidebook on nuclear techniques in hydrology. Technical reports series n. 91, Vienna.

IAEA (1971) - Nuclear well logging in hydrology. Technical reports, series n. 126, Vienna.

Lallemand A. & Grison G. (1970) - Contribution à la

selection de traceurs radioactifs pour l'hydrogéologie. In: Isotope Hydrology, IAEA, Vienna 1970.

Maestrini A. (1965) - Contribution à l'étude d'un courantmètre horizontal à neutrons par la méthode de dilution ponctuelle. CEA-CENG, DR/SAR-0/65 - 33/AM/MC, Grenoble, 1965.

Magri G. & Tazioli G.S. (1968) - Tecniche di misura del radon in idrogeologia e prime applicazioni alle acque sotterranee della Puglia. Geol. Appl. e Idrogeol., III, 85-108.

Mairhofer J. (1963) - Bestimmung der strömungsrichtung des groundwassers in einem einzigen bohrloch mit hilfe radioaktiver elemente. Atompraxis, vol. 9.

Mosetti F. (1961) - Misure della velocità di flusso dell'acqua mediante la diffusione di un tracciante. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata, III, 12.

Pirastru E., Carlin F. & Dai Pra G. (1966) - Prime applicazioni di sonde a neutroni per la rivelazione di un tracciante stabile (cadmio) in idrogeologia. Geol. Appl. e Idrogeol., I, 123-127.

U.S. Department Of Health (1960) - Radiological health handbook, Education and Welfare.

Spizzico M. (1998) - I recenti esperimenti nel campo dei traccianti chimici solubili. Laboratorio di Idrogeologia, Istituto di Geol. Appl. e Geotecnica, Politecnico di Bari. comunicazione personale agli autori.

Spizzico M. & Tadolini T. (1997) - Correct management of groundwater resources as related to the hydrogeological environment: the case of the apulian carbonatic aquifer. Inter. Conf. on "Water management, salinity and pollution control towards sustainable irrigation in the mediterranean region", Bari 22-26 sett. 1997.

Tadolini T., Sciannamblo D., Sdao F. & Spizzico M. (1995) - Sulle possibilità di recupero di efflussi idrici in aree costiere della zona compresa fra T. Columena e P. Cesareo (Lecce). Atti Il Conv. Nazionale sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee, vol. I, Modena 17-19 maggio 1995.

Tazioli G.S. (1973) - Metodologie e tecniche radioisotopiche in idrogeologia. Geol. Appl. e Idrogeol., VIII, parte II, 209-230.

Tadolini T. & Spizzico M. (1996) - ^{222}Rn as a powerful tool for solving hydrogeological problems in karst areas. Int. Symposium on "Groundwater discharge in the coastal zone", Moscow 6-10 luglio 1996, 98-107.

Tadolini T., Spizzico M. & Sciannamblo D. (1996) - Variazioni di concentrazioni del Radon nelle acque di una sorgente costiera subaerea a Nord di Brindisi. Mem. Soc. Geol. It., 51, 989-993.

Tadolini T., Tazioli G.S. & Tulipano L. (1971) - Idrogeologia della zona delle sorgenti Idume (Lecce). Geol. Appl. e Idrogeol., VI, 41-64.

Tazioli G.S. (1986) - Sullo studio degli acquiferi in vista di sfruttamenti per usi civili. Esempi di impiego di tecniche che si basano sull'uso di traccianti artificiali e di isotopi ambientali. Ambiente: Protezione e Risanamento, Ed. Pitagora, vol. I: Le Acque.

Tulipano L., Cotecchia V. & Fidelibus M.D. (1990) - An example of multitracting approach in the studies of karsting and coastal aquifers. Intern. Sympos. Field Seminar on Hydrogeol. in Karst Terranes. Turchia, 7-17 october 1990.